



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**“Propuesta del modelo de localización espacial de
contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del
aire en la ciudad de Lima”**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Alfonso Alberto ROMERO BAYLÓN

ASESOR

Dra. Silvia del Pilar IGLESIAS LEÓN

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Romero, A. (2020). *Propuesta del modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire en la ciudad de Lima*. Tesis para optar grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

Código ORCID del autor	"000-0002-4433-0111"
DNI o pasaporte del autor	31625834
Código ORCID del asesor	0000-0003-4616-8178
DNI o pasaporte del asesor	06018064
Grupo de investigación	GI Tecnología e Innovación en Minería - TIM
Agencia financiadora	No aplica
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lugar: Lima metropolitana. Coordenadas geográficas: Base rectangular A(W77°12', S11°12'), B(W76°48', S11°42'), C(W76°48', S12°18'), D(W77°12', S12°48').
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2018 AL 2020
Disciplinas OCDE	2.7 Ingeniería Ambiental Ingeniería ambiental http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Nota: tomar en cuenta la forma de llenado según las precisiones colocas en la web.

https://sisbib.unmsm.edu.pe/archivos/documentos/recepcion_investigacion/Hoja%20de%20metadatos%20complementarios_30junio.pdf



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los treinta días del mes de octubre del año dos mil veinte, siendo las once horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000068-2020-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 20 de octubre del 2020, con la finalidad de evaluar la sustentación virtual a la amparo de la Directiva de la UNMSM aprobada con Resolución Rectoral N° 01357-R-20 de la siguiente tesis:

TÍTULO

«PROPUESTA DEL MODELO DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LIMA»

Presentada por el Mg. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN, para optar el GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 04868/FIGMMG/2018 de fecha 31 de mayo del 2018, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (18)

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES al Mg. ALFONSO ALBERTO ROMERO BAYLÓN.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.



Firmado digitalmente por
GALLARDAY BOCANEGRA Tomas
Ezequiel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 02.11.2020 09:12:49 -05:00

DR. TOMÁS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
Presidente

DR. JAIME CÉSAR MAYORGA ROJAS
Secretario

DR. FRANCISCO JAVIER WONG CABANILLAS
Miembro



Firmado digitalmente por IGLESIAS
LEON Silvia Del Pilar FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 02.11.2020 11:21:29 -05:00

DRA. SILVIA DEL PILAR IGLESIAS LEÓN
Asesor

DEDICATORIA

A Teodora y Bernardo mis queridos padres, en honor a sus enseñanzas orientadas al valor e identidad de su estirpe genealógico, asimismo a Raúl, Rómulo, Julián, Esperanza y toda mi familia quienes me dan fortaleza.

AGRADECIMIENTO

A mis colegas y docentes quienes hicieron su contribución a esta Investigación compartiendo su sapiencia global en forma altruista.

INDICE GENERAL

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1.	Entorno actual	1
1.2.	El problema de estudio	2
1.2.1.	General	2
1.2.2.	Específicos	3
1.3.	Sustentación de la investigación	3
1.3.1.	Teórica	3
1.3.2.	Aplicativa	3
1.4.	Objetivos de la investigación	4
1.4.1.	General	4
1.4.2.	Específicos	4

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.	Base filosófica	5
2.2.	Antecedentes de la investigación	5
2.3.	Bases teóricas	9
2.4.	Marco conceptual	14
2.5.	Marco normativo	15

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1.	Tipo diseño de la investigación	16
3.2	Unidad de análisis	18
3.3	Población de estudio	20
3.4	Tamaño y selección de muestra	20
3.5	Técnicas de recolección de datos	21
3.6	Validación de datos	22
3.7	Hipótesis general	22
3.8	Hipótesis específicas	23
3.9	Identificación de variables	23
3.10	Operacionalización de variables	24

CAPITULO IV: CALIDAD DEL AIRE Y CONTAMINACION ATMOSFERICA

4.1.	Generalidades	25
4.1.1.	La atmosfera y sus características	25
4.1.2.	El aire y sus componentes	28
4.1.3.	Componentes nocivos en el aire	30
4.1.4.	Calidad del aire	32
4.2.	Indicador de calidad del aire	34
4.2.1.	Indicador ICA	34
4.2.2.	Niveles de concentración y calidad de aire	35
4.2.3.	Niveles de concentración y tipo de aire	38
4.2.4.	Rangos de concentración de calidad de aire	40
4.3.	Modelos basados en expresiones matemáticas	44
4.3.1.	Modelos con base Gaussiana	44
4.3.2.	Modelos con base Euleriana	45
4.3.3.	Modelos con base Lagrangeana	46
4.3.4.	Modelo MDLE	46

CAPITULO V: MODELO DE LOCALIZACION ESPACIAL - MDLE

5.1	Aspectos topográficos y climáticos	48
5.1.1	Topografía	49
5.1.2	Clima	52
5.2	Condiciones de frontera o dimensión 3D	56
5.2.1	Geométrica	56
5.2.2	Zonas espaciales atmosféricas	59
5.3	Algoritmos del modelo	63
5.3.1	Algoritmo de Stirling	63
5.3.2	Algoritmo de Kriging	67
5.4	Datos de entrada (Input)	75
5.5	Proceso de cálculo	82
5.5.1	Interpolación en 2D	83
5.5.2	Interpolación en 3D	83

5.6	Datos de salida (Output)	83
5.6.1	Isovalores de partículas	86
5.6.2	Isovalores de gases	86
 CAPITULO VI: RESULTADOS OBTENIDOS		
6.1	Análisis e interpretación de resultados	93
6.1.1	Estadística de resultados	93
6.1.2	Geo estadística de resultados	96
6.1.3	Interpretación de resultados para PM ₁₀	97
6.2	Prueba de hipótesis	105
6.2.1	General	105
6.2.2	Prueba de la primera hipótesis específica	106
6.2.3	Prueba de la segunda hipótesis específica	106
6.2.4	Prueba de la tercera hipótesis específica	106
6.3	Presentación de resultados	108
6.3.1	Por elementos contaminantes	108
6.3.2	Por zona espacial atmosférica en m s.n.m	114
6.4	Validación del modelo MDLE	116
6.4.1	Validación multivariable	116
6.4.2	Validación Geoestadística del MDLE	118
CONCLUSIONES		120
RECOMENDACIONES		121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		122
 ANEXOS		
ANEXO I.- Nomenclatura de estaciones de medición de SENAMHI		124
ANEXO II.- Matriz de Consistencia		125
ANEXO III.- Datos generales de las estaciones de medición de SENAMHI		128
ANEXO IV.- Resultados diversos por elementos contaminantes del modelo MDLE		134

LISTA DE .FIGURAS

No. De Figura	Descripción	Página
CAPITULO II		
Figura 1	Fuentes de contaminación Naturales y antropogénicas	10
Figura 2	Fuentes de contaminación puntual y lineal	10
Figura 3	Las plumas de contaminación atmosférica	11
Figura 4	Gases tóxicos de plumas de emisión	12
Figura 5	Modelos chimeneas o plumas de dispersión	13
CAPITULO III		
Figura 6	Área rectangular del modelo MDLE	18
Figura 7	Coordenadas UTM del área superficial del modelo MDLE	19
Figura 8	Método de toma de datos y técnica de recolección de datos	22
CAPITULO IV		
Figura 9	Masa porcentual atmosférica en los 10Km de altitud	25
Figura 10	Zonas espaciales atmosféricas con longitud media	27
Figura 11	Longitudes de la troposfera donde se ubica el aire	29
Figura 12	Proceso de alteración de componentes del aire	31
Figura 13	Índice de calidad de aire - ICA	34
Figura 14	Estados de calidad de calidad de aire ICA	35
Figura 15	Estados de alerta nacional de calidad de aire	36
Figura 16	Estándar de calidad de aire ECA	36
Figura 17	Clasificación del estado de calidad del aire	37
Figura 18	Rango de valores para PM _{2.5}	38
Figura 19	Rango de valores para PM ₁₀	38
Figura 20	Calculo de rangos de valor por elemento contaminante	39
Figura 21	Cálculo de rangos de valor para PM ₁₀ y su relación con el índice - INCA	40
Figura 22	Cálculo de rangos de valor para PM _{2.5} y su relación con el índice- INCA	40
Figura 23	Calculo de rangos de valor para SO ₂	42
Figura 24	Calculo de rangos de valor para NO ₂	42
Figura 25	Esquema conceptual del modelo Gaussiano.	45
CAPITULO V		
Figura 26	Curvas de nivel de la superficie topográfica del modelo	49
Figura 27	Curvas de nivel 3D de la superficie topográfica del modelo	50
Figura 28	Curvas de nivel 2D de la superficie topográfica del modelo	51
Figura 29	Temperatura mínima y máxima en Lima	52
Figura 30	Velocidad promedio del viento en Lima	53
Figura 31	Dirección promedio de viento en Lima	54
Figura 32	Variación de la presión según altitud	54
Figura 33	Variación de la temperatura según altitud	55

Figura 34	Dimensiones del área de la base del paralelepípedo del modelo en plano X,Y	56
Figura 35	Condiciones de frontera 3D del modelo en espacio (X,Y,Z)	57
Figura 36	Vista en 3D de modelo MDLE	58
Figura 37	Distribución por altitud de la atmosfera	59
Figura 38	Altitud de la atmosfera con acumulación de ozono	60
Figura 39	Vista del área superficial del modelo MDLE	61
Figura 40	Base rectangular del modelo MDLE	62
Figura 41	Celdas (dx,dy,dz) para interpolación Kriging	68
Figura 42	Radio de búsqueda en celda (dx,dy,dz) para interpolación Kriging	69
Figura 43	Adaptación de la geometría del modelo a la topografía superficial	70
Figura 44	Volumen a estimar por Kriging.	70
Figura 45	Transferencia de influencia y efecto de pantalla	71
Figura 46	Krigeado puntual en una dimensión versus interpolador de mínimos cuadrados.	74
Figura 47	Elipsoide de búsqueda en una celda (dx,dy,dz).	74
Figura 48	Estaciones de toma de datos de SENAMHI	76
Figura 49	Datos de ingreso en su formato inicial en formato xls	77
Figura 50	Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para Huachipa	78
Figura 51	Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para VMT	78
Figura 52	Datos de ingreso del inicio del archivo Station_ASSAY.	79
Figura 53	Datos de ingreso del final del archivo Station_ASSAY.	80
Figura 54	Cuatro archivos principales de ingreso al MDLE.	81
Figura 55	Archivos principales del MDLE en formato SCV.	81
Figura 56	Interpolación 2D del MDLE en el área asignada.	82
Figura 57	Interpolación 3D en todo el ámbito del MDLE.	83
Figura 58	Selección en 3D de todo el ámbito del MDLE.	84
Figura 59	Zoom en 3D del área de selección.	84
Figura 60	Desplazamiento del área de selección al extremo superior del modelo.	85
Figura 61	Vista en 3D de isovalores de PM ₁₀ .	86
Figura 62	Vista en 2D de isovalores de PM ₁₀ .	87
Figura 63	Vista en 3D de isovalores de PM ₁₀ en otra cota.	88
Figura 64	Curvas de isovalores de PM ₁₀ .	89
Figura 65	Curvas de isovalores de CO.	90
Figura 66	Curvas de isovalores de CO ampliada con zoom	91
Figura 67	Curvas de isovalores de CO a detalle	92
CAPITULO VI		
Figura 68	Histograma de distribución normal para PM _{2.5} .	93
Figura 69	Histograma de log-normal para PM _{2.5} .	94
Figura 70	Frecuencia acumulada para PM _{2.5} .	94
Figura 71	Interrelación multivariada para PM _{2.5} y SO ₂ .	95
Figura 72	Interrelación multivariada para PM _{2.5} y PM ₁₀ .	95
Figura 73	Interrelación multivariada para O ₃ y SO ₂	95

Figura 74	Semi variogramapara PM _{2.5}	96
Figura 75	Semi variograma para O ₃ .	96
Figura 76	Semi variograma espacial para PM _{2.5} y SO ₂ .	96
Figura 77	Isovalores de PM ₁₀ en lima metropolitana	101
Figura 78	Variación de valores de PM ₁₀	102
Figura 79	Isovalores de valores en µg /m ³ PM ₁₀ .	103
Figura 80	Isovalor de valor calculado por algoritmos.	108
Figura 81	Isovalor de valor obtenido con modelo para PM ₁₀	109
Figura 82	Isovalor de valor obtenido para SO _x	110
Figura 83	Isovalor de valor obtenido para NO _x	111
Figura 84	Isovalor de valor obtenido para O ₃	112
Figura 85	Isovalor de valor obtenido para CO	113
Figura 86	Isovalor de valor obtenido para PM ₁₀ a 400 msnm	114
Figura 87	Isovalor de valor obtenido para PM ₁₀ a 9000 msnm	115
Figura 88	Tendencia unilineal de datos para el CO _x .	117
Figura 89	Salto de variograma de la Geoestadística del MDLE	118
Figura 90	Semivariograma 3D componentes de atmosféricos PM y SO	119

LISTA DE TABLAS

No. De Tabla	Descripción	Página.
CAPITULO III		
Tabla 1	Coordenadas UTM de los puntos superficiales del modelo	18
Tabla 2	Nomenclatura de las estaciones	21
Tabla 3	Descripción de variables	23
Tabla 4	Operacionalización de variables	24
CAPITULO IV		
Tabla 5	Principales componentes de aire	28
Tabla 6	Principales gases de efecto invernadero	30
Tabla 7	Valor medio de partículas en suspensión	40
Tabla 8	Comparación de valores medios para partículas	41
Tabla 9	Comparación de valores para SO ₂	42
Tabla 10	Comparación de valores para NO ₂	43
Tabla 11	Comparación de valores para O ₃	43
CAPITULO V		
Tabla 12	Sistema de ecuaciones del kriging en xi , i: 1,N.	72
Tabla 13	Sistema de ecuaciones 3D del kriging en (xi , yj , zk,)	73
Tabla 14	Coordenadas UTM de las estaciones de monitoreo en metros	75
CAPITULO VI		
Tabla 15	Colores y rango de valores establecidos por ICA - Minam	97
Tabla 16	Estado, rango y color de calidad de aire	98
Tabla 17	Índice INCA para partículas en suspensión	98
Tabla 18	Índice INCA para SO _x y NO _x	99

Tabla 19	Categorías del estado del aire según color y rango INCA	99
Tabla 20	Rango del valor de concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por cada elemento contaminante	100
Tabla 21	Rango de valores de PM_{10} y otros elementos	104
Tabla 22	Rango de valores INCA	104
Tabla 23	Identificación del estado del aire con valor obtenido del modelo para $\text{PM}_{2.5}$	108
Tabla 24	Identificación de estado del aire con valor obtenido de modelo para PM_{10}	109
Tabla 25	Identificación de estado del aire con valor obtenido para SO_x	110
Tabla 26	Identificación de estado del aire con valor obtenido para NO_x	111
Tabla 27	Identificación de estado del aire con valor obtenido para O_3	112
Tabla 28	Identificación de estado del aire con valor obtenido para CO	113
Tabla 29	Distribución multilínea de datos adquiridos a SENAMHI	116
Tabla 30	Distribución multilínea de datos de Stirling	117

RESUMEN

Actualmente, la contaminación atmosférica se incrementa en el planeta tierra debido a las actividades del hombre, encontrándose en el espacio troposférico concentraciones de los elementos contaminantes cada vez más a mayor altitud respecto a la superficie de la tierra, saturando las diferentes zonas espaciales de la atmósfera y alterando el estado inicial causando anomalías en los factores climáticos como las precipitaciones pluviales, vientos huracanados e incremento de temperatura en el planeta en forma agresiva.

El modelo de localización espacial (MDLE) de contaminantes atmosféricos diseñando en esta investigación, precisa a distintas altitudes, las concentraciones de los elementos contaminantes, al calcular las dichas concentraciones en la atmósfera e interpretar el comportamiento de los mismos. Asimismo, determina la ubicación de los contaminantes en toda la longitud de la tropósfera considerando rangos cada 500 metros de altitud considerando las altitudes de la capa límite y espacio externo a esta capa hasta una altitud de diez mil metros en función de la variación de la presión atmosférica, altitud sobre el nivel del mar y la variación de la temperatura en la troposfera. Los algoritmos calculan las concentraciones de los contaminantes en el espacio aéreo de la troposfera, y compara con los indicadores de calidad ECA (Estándares de Calidad de Aire) en la troposfera correspondiente a la superficie de la ciudad de Lima permitiendo establecer el estado del aire comparando con el INCA (Indicador de calidad de Aire).

En el modelo, relacionamos los aspectos meteorológicos, en altitudes a lo largo de la troposfera cada quinientos metros estudiando el comportamiento del ozono, elemento importante para la preservación de la vida en la superficie terrestre.

Palabras clave: Modelo de localización espacial, Contaminantes atmosféricos, Algoritmos, zonas espaciales de atmosfera.

ABSTRACT

Currently, air pollution is increasing on planet earth due to human activities, with concentrations of pollutants increasingly in tropospheric space at higher altitudes compared to the earth's surface, saturating the different spatial zones of the atmosphere and altering the initial state causing anomalies in climatic factors such as rainfall, hurricane force winds and an increase in temperature on the planet and deterioration of the ozone layer in an aggressive way.

The spatial location model (MDLE) of atmospheric pollutants designing in this research, specifies the concentrations of the polluting elements at different altitudes, calculating these concentrations in the atmosphere and interpreting their behavior. Also determined the location of the pollutants throughout the length of the troposphere considering ranges every 500 meters of altitude considering the altitudes of the boundary layer and the space outside this layer up to an altitude of ten thousand meters depending on the variation in pressure atmospheric, altitude above sea level and temperature variation in the troposphere. Algorithms calculate the concentrations of pollutants in the troposphere airspace, and compares with the quality indicators ECA ("Estandares de Calidad de Aire") in the troposphere corresponding to the surface of the city of Lima allowing to establish the state of air compared to INCA ("Indicador de Calidad de Aire").

In the model, we relate meteorological aspects, at altitudes along the troposphere every five hundred meters, studying the behavior of ozone, an important element for the preservation of life on the Earth's surface.

Keywords: Spatial location model, atmospheric pollutants, algorithms, space atmospheric zones.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Entorno actual

Los elementos contaminantes atmosféricos actualmente son evaluados y monitoreados a una Altitud de 10 metros sobre el nivel del mar a nivel local los mismos que describen a los contaminantes en la atmosfera, dependiendo del foco de emisión, las herramientas de apoyo o soporte técnico científico para esta actividad es a través de los modelos determinísticos de medición, como el modelo gaussiano, de tipo local que depende de la pluma o penacho de emisión así como el caudal de la misma, el modelo numérico y de partícula (Szepesi, 1989), conocidos también como estáticas y dinámicas, los modelos mixtos y los modelos estadísticos de característica unidimensional o lineal en su trayectoria unidireccional, todos estos modelos, evalúan dichos contaminantes y, no consideran la variable espacial de los elementos de contaminación en las zonas espaciales de la atmosfera, razón por el cual la localización de contaminantes en la atmosfera, no están definidas por ninguno de estos modelos y, que hace falta un modelo que incluya la variable geo espacial siendo este factor el motivo de la presente investigación en el modelo denominado MDLE.

Los modelos de alcance medio, aquellas que se encuentran entre los modelos regionales y locales, rescatan los valores promedio existentes en el espacio del contenido o la concentración de dichos contaminantes, sin embargo, no hay modelo a la fecha que ubique a los contaminantes en la atmosfera considerando la característica geoespacial.

Los modelos de dispersión intentan ubicar en el espacio a los contaminantes (en 3D), sin embargo, su alcance geoespacial es limitado a nivel local porque depende mucho de la fuente de emisión, así como de la altitud de la pluma o chimenea cuyas dimensiones son cortas en relación al alcance regional este factor es crítico y limita a estos modelos reflejar

únicamente una realidad local y no así a una realidad regional a mayores altitudes en la atmosfera.

Debido a la naturaleza local de los modelos existentes, los mismos que se aplican a la fecha para la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Lima, no consideran la localización de contaminantes atmosféricos, la falta de esta ubicación restringe la evaluación de la calidad del aire únicamente a variables locales y como resultado el rango de precisión es relativamente amplio.

La cuantificación de los contaminantes en el aire así como su ubicación espacial respecto a la superficie terrestre que presentamos en esta investigación, permiten evaluar la saturación del aire en la ciudad de Lima, mientras que tradicionalmente, esta medición es en la superficie de la tierra a una altitud promedio que va de 0 hasta 10 metros y no considera otros alcances como la capa limite y la zona exterior a esta capa en la atmosfera.

1.2. El problema de estudio

- General

¿En qué medida el modelo de localización espacial (MDLE), de contaminantes atmosféricas, precisa a distintas altitudes, el nivel de calidad del aire en la ciudad de Lima?

- Específicos

1. ¿Cómo se relacionan los aspectos meteorológicos en el modelo, con la calidad del aire en la ciudad de Lima?
2. ¿En qué medida las características geográficas en el modelo, se relacionan con la calidad del aire en la ciudad de Lima?
3. ¿Contribuye el uso de algoritmos en el modelo, con los niveles de calidad del aire en la superficie de Lima?

1.3. Sustentación de la investigación

1.3.1 Teórica

Esta investigación amplía el rango de los algoritmos Kriging y Stirling relacionándoles biunívocamente mediante la interpolación unidimensional y tridimensional respectivamente insertando a los modelos espaciales dando la posibilidad a dichos modelos ampliar sus alcances en cotas mayores a los existentes en la superficie terrestre. La información obtenida del modelo MDLE, ubica con precisión a los elementos contaminantes en la atmosfera y los presenta en mapas y cuadros estadísticos, los mismos que consolidan la robustez científica de la investigación.

1.3.2 Aplicativa

Este modelo MDLE, tiene el atributo de adaptabilidad a otras regiones o ciudades, por eso, su aplicación, es versátil y basta con modificar los datos geográficos y las condiciones de frontera en el ingreso de datos (DATA INPUT), donde varían según las ciudades las coordenadas UTM, la altitud que se desea estudiar así como la distancia en el eje de coordenadas X, Y representado por la orientación Este-Oeste y Norte-Sur, respectivamente según el criterio de las coordenadas UTM. El cálculo de los contaminantes atmosférico en un nuevo espacio tridimensional entrega los resultados con la misma precisión garantizada de los algoritmos de Stirling y Kriging y dependiendo del Estándar de Calidad de Aire del País donde se encuentran las Ciudades se usa como herramienta para evaluar los niveles de saturación del aire, según el ECA, del país, donde se encuentra la ciudad.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. General

Establecer la precisión de la concentración de los contaminantes atmosféricos a distintas altitudes, en la ciudad de Lima.

1.4.2. Específicos

1. Comprobar la relación de influencia de los aspectos meteorológicos considerados en el modelo, con la calidad del aire a distintas altitudes de la ciudad de Lima.
2. Establecer la influencia de las características geográficas en el modelo, y su relación con la calidad del aire en Lima.
3. Verificar la contribución de los algoritmos en el modelo con la ubicación precisa y georreferenciada de los contaminantes troposféricos, sobre la ciudad de Lima.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Base filosófica

Según el Filósofo Anaximenes, M (-538 a.c.), quien considera que la esencia de la existencia es el aire. Los seres vivos existen, por la presencia del aire que se respira. De éste componente, nacen las cosas, y a él vuelven cuando se corrompen en su naturaleza. Asimismo; las características de la materia, cualquiera que sea, su estado (estados de la materia), son productos de la expansión de los componentes del aire.

2.2. Antecedentes de la investigación

Salvador Martínez, Pedro (2015). Caracterización de la contaminación atmosférica producida por partículas en suspensión en Madrid. España.

La presente investigación se realizó en el ayuntamiento de Madrid, Comunidad Autónoma de Madrid, entre 2010-2015, en este estudio se ha abordado como objetivo el estudio, bajo una perspectiva multidisciplinar, de la contaminación por partículas atmosféricas en suspensión en la cuenca de Madrid, analizando series anuales, pero en forma permanente por día, concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, obtenidos en distintas estaciones de medida de este área geográfica durante un periodo de cinco años (2010 – 2015). Este proceso se hizo, a partir del desarrollo experimental llevada a cabo en varios lugares de Madrid con diferentes instrumentos de medición, se han obtenido nuevas series de datos, incluyendo en este caso la medida por primera vez, niveles de PM_{2.5}. El análisis estadístico de estos datos ha permitido asimismo profundizar en su origen y establecer las categorías o fuentes de emisión, así como estimar los aportes de las fuentes a los niveles de inmisión de este contaminante, obtenidos diariamente en Madrid e identificar regiones fuente remota de aportes de PM₁₀ a dichos niveles.

Molina Jiménez, Pedro (2013). “Simulación numérica de un problema de contaminación atmosférica”. Madrid. España.

Las derivadas parciales de difusión con reacción química es el principio de los modelos a efectos de la dispersión de contaminantes, los diversos métodos numéricos aplicados en su resolución son objeto de amplios análisis en el contexto de su desarrollo. Asimismo, muestra un método conservador para la resolución de la parte advectiva, por medio de derivadas parciales, modelando así, la dispersión de contaminantes y su transporte químico, basado en elementos finitos y su correspondiente interpolación, asimismo, este método; esta fundamentado, en la conservación exacta de la masa que es transportada, específicamente, la ley de conservación de las masas.

Cáceres Lillo, Dante (2015). Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material fino $PM_{2.5}$ en niños que viven próximos a una playa contaminada masivamente con relaves mineros, Chanaral, Chile.

Este estudio, realizó un análisis longitudinal, en una muestra representativa de 140 escolares entre 6 y 15 años que viven cerca de una playa contaminada por relaves mineros, la muestra, fue sometida a exámenes de función de la respiración en periodos de dos semanas. La determinación de metales, fueron realizados por fluorescencia de rayos x. Las relación, entre la exposición diaria a $PM_{2.5}$ y, los cambios en la función del pulmón, fueron estimadas por modelos de regresión, observándose una disminución notoria, en la capacidad vital frente a la exposición a partículas $PM_{2.5}$.

Contreras Gutiérrez, Paulina (2012). Determinación de contaminantes en lugares remotos y otros problemas analíticos en Granada. España.

En la investigación señalada, desarrollaron el método que permite determinar metabolitos mayoritarios en la palta. Aplicando, dos aproximaciones analíticas diferentes para caracterizar extractos de palta, llegando a obtener la contaminación por CO_2 , representada por una reacción en cadena en forma exponencial.

Sanin Cortez, Nancy (2002). Construcción de un modelo tridimensional para ajustes de campos de viento y dispersión de contaminantes en la atmosfera en Granada, España.

En este modelo, se aplican las coordenadas según la topografía de terreno y permite una construcción sencilla de la grilla correspondiente al dominio del problema planteado, y se reduce a un cubo unitario. Este modelo de diagnóstico permite el ajuste de campos de viento y la generación de mapas de viento con medidas obtenidas a partir de estaciones, por tanto, para el problema de convección-difusión-reacción, este modelo proporciona interesantes propiedades de consistencia y estabilidad.

Velásquez Angulo, Gilberto (2008), Diseño de una red de monitoreo atmosférico para la ciudad de San Luis Potosí: Ubicación de nodos. México.

Como objeto principal, esta investigación desarrolla la metodología que permite calcular, la ubicación de las estaciones de monitoreo de la contaminación por origen industrial; el estudio está basado en el análisis de SO_2 como trazador de la contaminación cuyo origen es de la industria. La zona geométrica del modelo es una malla de (20km, 20km), con celdas de (1km, 1km)., y se estimaron promedios de concentraciones por día y por año de SO_2 en cada celda de dimensión indicada. Se encontró que la concentración anual tope, fue de 61.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el máximo promedio por día de 286.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración por hora máxima fue de 1,285 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Leyva M, (2007), en su publicación química ambiental, clasifica a los contaminantes atmosféricos en primarios, los cuales van directamente a la atmosfera como el SO_2 , que daña a la vegetación e irrita a los pulmones. En esta publicación, se establece como contaminantes secundarios, a aquellos con origen de procesos químicos en la atmosfera, y al actuar sobre los contaminantes primarios se transforman en ácido sulfúricos que se forma por la oxidación del SO_2 , el dióxido de nitrógeno NO_2 que se forma al oxidarse el NO , y el ozono O_3 , a partir del O_2 .

Los tipos de problemas de contaminación atmosférica, mas importantes son: Emisiones toxicas accidentales, Contaminación urbana (SO_2), contaminación urbana (smog fotoquímico O_3), Emisiones de las grandes fundiciones de cobre, lluvia acida y contaminación vehicular (Gerraud R., 2006).

Debido a los grandes focos de emisión de gases por las fábricas y los vehículos, la generación de partículas finas por medio antrópico y medio natural, así como las emisiones de las grandes urbes por los humanos, la contaminación atmosférica son sustancias en una cantidad que implica molestias o riesgos en las personas y el resto de los seres vivos. Los principales focos de contaminación atmosférica son los espacios industriales que emplean la combustión, asimismo, el parque automotor y calentadores residenciales, que generan el grupo CO_x , NO_x y SO_x , igualmente los gases emitidos por las fabricas como cloro e hidrocarburos que no han realizado combustión completa (Martínez et al, 2004).

2.3. Bases Teóricas

2.3.1.1. Gases contaminantes de la atmosfera

Por primera vez, se establece como tales desde los años 60, los cuales son, los clorofluorocarbonos (CFC, ó "freones"), de efectos negativos: destruyen la capa de ozono en la zona siguiente de la troposfera, e incrementan el efecto invernadero. Los aerosoles ahora en adelante son sustituidos por otros gases, como el CO₂ (Martínez, 2004).

2.3.1.2. Sustancias contaminantes atmosféricas

Es considerado así por (Seinfeld, 1986), a cualquier sustancia que forma parte del aire en concentraciones más allá de su nivel normal y que produce efectos medibles en personas, animales, vegetación o materiales. Entre las clases de contaminantes tenemos: CO, SO₂, (O₃,. Partículas: Aerosoles líquidos o aerosoles sólidos. Primarios: emitidos directamente a la atmósfera. Secundarios: formados en la atmósfera en transformaciones físico-químicas y Según sus contenidos químicos: compuestos con carbono y con azufre(Seinfeld, 1986).

2.3.1.3. Fuentes de contaminación atmosférica

Schmitz R., (2006), indica que las fuentes de contaminación atmosférica que se presentan son:



.Figura 1: Fuentes de contaminación Naturales y antropogénicas
Fuente: Schmitz R, y otros (2006)



.Figura 2: Fuentes de contaminación puntual y lineal
Fuente: Schmitz R, y otros (2006)

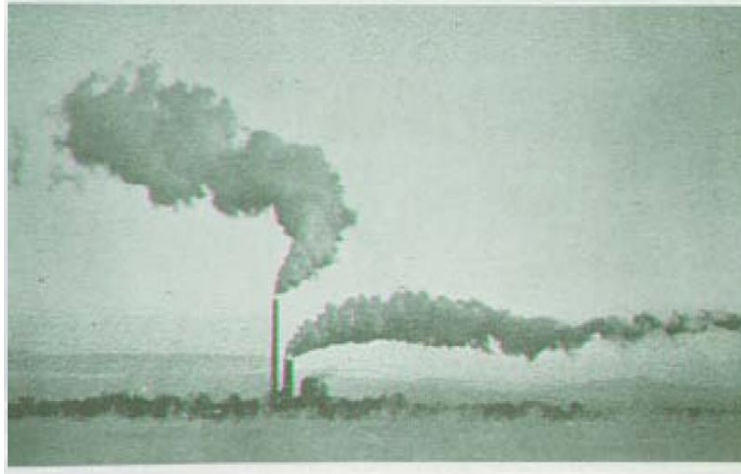


.Figura 3: Las plumas de contaminación atmosférica

Fuente: Schmitz R, y otros (2006)

2.3.1.4. Dispersión de contaminantes

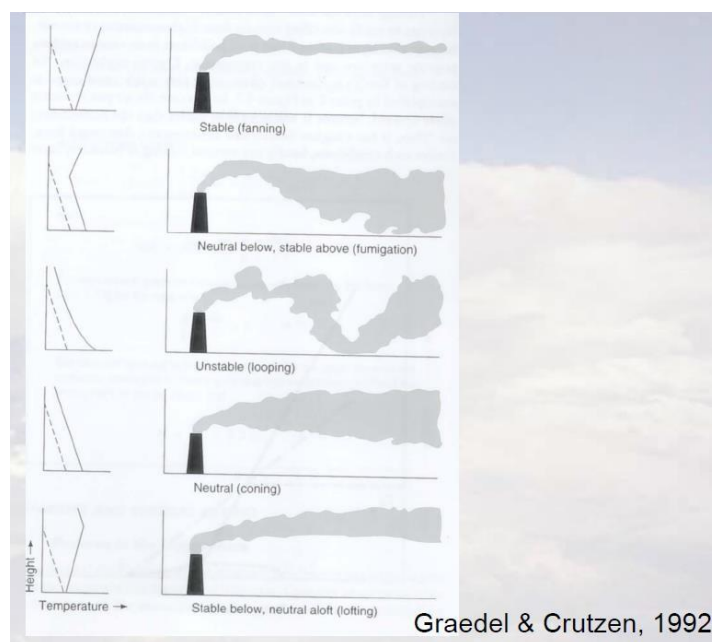
Gerraud R., (2006), este trabajo se basa en el conocimiento científico o positivo pues pasó por distintas etapas desde su inicio, deja también abierta la posibilidad de comprobar o rechazar mis hipótesis, en el desarrollo de esta tesis he considerado las corrientes filosóficas, positivista, Auguste Comte, refutabilidad de Karl R. Popper y pragmatismo de William James. Indica que los factores meteorológicos de la contaminación atmosférica que influyen en un modelo de distribución de contaminantes son: Transporte y Dispersión, entendiéndose este último como la movilidad de las sustancias contaminantes desde su foco de emisión como plumas de emisión de gases en las fábricas y su desplazamiento por el viento alrededor de este pluma de emisión.



.Figura 4: Gases tóxicos de plumas de emisión
Fuente: Gerraud Rene.(2006).

2.3.1.5. Plumitas de dispersión

En el cuadro siguiente, (Graedel et al, 1992), muestran los distintos formas de desplazamiento de los contaminantes a través de las chimeneas o plumas de emisión de las fabricas con procesos industriales de los productos así como de las fundiciones y refinerías, cada uno de los esquemas tiene un modelo matemático de dispersión a aplicar para el estudio del transporte de los contaminantes.



.Figura 5: Modelos chimeneas o plumas de dispersión
Fuente: Graedel y otros (1992)

2.3.1.6. Indicadores de calidad de aire

Clasificado en bueno, moderado, malo, muy malo y alerta máxima, basada en los valores establecidos por los Estándares Nacionales de Calidad del Aire – ECA, así como los Niveles de Alerta Nacional de Contaminantes del Aire. Expresados en Indicador de Calidad de Aire - ICA, que es una herramienta relacionado a la explicación de la calidad del aire (SENAMHI, 2013).

2.3.1.7. Velocidad de viento

Medido a niveles bajos de la atmósfera, y registra, los vientos fuertes del oeste a este con intensidades mayores a 10 m/s y de débiles a moderados (2 a 4 m/s), mayormente del este sobre el continente sudamericano y del sur y sureste sobre bajas latitudes. A nivel del mar, los vientos con dirección del sur-sureste a sureste y velocidades varían entre 2 y 7 m/s. Asimismo, la velocidad máxima media es ligeramente menor (0,3 m/s), que su valor climático, en la categoría de vientos moderados según (SENAMHI, 2011).

2.3.1.8. Inversión Térmica

Afloramiento marino activo e intensa inversión térmica con altitud promedio de su base a 358 m, espesor medio 228 m y gradiente promedio de 1,4°C/100 m. SENAMHI, (2011).

2.3.1.9. Temperatura atmosférica

Temperatura atmosférica. Según SENAMHI, (2011), aquella que se presenta en promedio en la ciudad de Lima varía según las estaciones del año cuya gradiente es lineal en el espacio atmosférico.

2.3.1.10. Humedad relativa

Saturación del medio atmosférico por moléculas de agua en suspensión conocido como humedad relativa en la atmosfera, la humedad relativa mínima media es 1% menor que su valor climático., pero en la ciudad de Lima este valor está por encima de los 80%. SENAMHI, (2011).

2.4. Marco conceptual

2.4.1 Dióxido de azufre - SO₂.- Es un gas incoloro que se percibe por un fuerte olor a niveles superiores a 0,5 ppm. El óxido sulfuroso, precede al ácido sulfúrico (H₂SO₄), el cual contribuye a la deposición ácida afectando al clima. Algunos focos de emisión, son la quema del carbón mineral, la combustión de hidrocarburos y los volcanes, se eliminan por reacción química, o por disolución en agua (Jacobson, 2002).

2.4.2 Modelamiento espacial.- Es la base científica de los fenómenos físicos expresados en expresiones matemáticas y se pueden elegir a partir de: Método de diferencias finitas, Métodos de elementos finitos, Métodos de volumen finito, Métodos de descomposición de dominio (Kiely, 2006).

2.4.3 Partícula menor de 10 micrómetros (PM).- El PM_{2.5}, corresponde a las partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a 2.5 µm y PM₁₀, a las menores de 10 µm³, pero mayor a 2.5 µm., provienen de los procesos de combustión y de fenómenos naturales. Las partículas son eliminadas de la atmósfera mediante dos mecanismos: la deposición en la superficie de la Tierra y la

incorporación a gotas de las nubes durante la formación de la lluvia (Seinfeld, 2006).

2.4.4 Modelos por ordenador.- Es el conocimiento científico y tecnológico que se integra en modelos matemáticos que se transforman en programas de cómputo (Kiely, 2006).

2.4.5 Modelo matemático.- Sistema de ecuaciones diferenciales. (Kiely, 2006).

2.4.6 Métodos híbridos.- Herramientas de modelización.- Aquellos relacionados con la predicción de fenómenos físicos a través de: Interpolación con ecuaciones diferenciales. (Kiely, 2006).

2.4.7 Óxidos de nitrógeno NO_x.- Originado en los procesos de combustión junto con el NO y se forma también en la atmósfera por la oxidación de NO, para representar a NO y NO₂ en conjunto se suele designar como NO_x. La importancia del dióxido de nitrógeno radica en su capacidad de absorber toda la gama visible y ultravioleta del espectro solar en la atmósfera inferior, el NO₂ (Seinfeld, 2006).

2.4.8 Ozono O₃.- Formado en la atmósfera por reacciones fotoquímicas con presencia de luz solar y contaminantes como los óxidos de **Nitrógeno NO_x** y diversos compuestos orgánicos volátiles (COV). Se destruye en reacciones con el NO₂ y se deposita en el suelo (OMS, 2005).

2.5. Marco normativo

(MINAN D.S. N°003, 2017), donde se aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), para Aire con sus respectivas disposiciones complementarias. Esta norma deroga al Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, al Decreto Supremo N° 069-2003-PCM, al Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM y al Decreto Supremo N° 006-2013-MINAM.

(MINSa D.S. N° 009, 2003)., su modificatoria y Directiva del Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales de Contaminantes del Aire.

(DIGESA R.D. N° 1404, 2005), Protocolo de Monitoreo de Calidad del Aire y Gestión de los Datos (Digesa, 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. **Tipo:** Aplicada, porque utiliza los algoritmos los de Stirling y kriging para procesar numéricamente de datos geoespaciales sustentado en el elipsoide de localización geoespacial para ubicar la posición en el espacio 3D del elemento estudiado en variables regionalizadas.

Nivel: Es de tipo evaluativo experimental, porque realiza iteraciones lógicas y algorítmicas con los datos originales de las fuentes de recolección de data procesándoles en el tiempo permitiendo ubicar el contaminante en el espacio así como su concentración de la misma.

3.1.2. Diseño de la investigación

En este estudio, establecemos tres variables independientes y una variable dependiente donde manipulando las variables independientes relacionadas a las concentraciones de los elementos contaminantes en el modelo espacial de localización, podemos relacionar con los indicadores de calidad según la cantidad de los contaminantes atmosféricos y encontrar el estado del aire. Este análisis se realiza en forma global considerando la totalidad de los focos de contaminación existentes en el área de estudio representados en este caso por las estaciones de monitoreo del SENAMHI de donde obtenemos los datos por horas y días las cuales están relacionados a los aspectos meteorológicos como la temperatura, velocidad del aire, humedad, altitud y cantidad de contaminante.

Mediante las variables independientes y al manipular las expresiones matemáticas en el espacio, identificamos el comportamiento de los contaminantes tanto en ubicación geoespacial como la cantidad en ($\mu\text{g} / \text{m}^3$),

de la misma y su consecuencia o efecto un determinado punto espacial en la zona espacial atmosférica de estudio.

Los procesos de experimentación se desarrollan mediante las iteraciones de los algoritmos, los diferentes valores de las concentraciones en ($\mu\text{g} / \text{m}^3$), de los elementos contaminantes encontrados mediante el algoritmo de Kriging basado en la ecuación del elipsoide geoespacial en el modelo y puede ser replicable en las grandes urbanizaciones.

La parte explicativa y cuantitativa del estudio están presentes al desarrollar el modelo MDLE, porque los resultados de georreferencia detallan la situación espacial y los valores de las concentraciones en ($\mu\text{g} / \text{m}^3$), son cuantificadas por las expresiones matemáticas presentes en cada algoritmo.

a.-) **Carácter explicativa.**- Relaciona las variables independientes del modelo con la variable dependiente teniendo en cuenta la ubicación geoespacial de los elementos contaminantes atmosféricos que viene a ser las variables independiente y la calidad del aire en la ciudad de Lima, que es la variable dependiente, el mismo que se precisa al manipular las tres variables independiente. Fernández., S (1998).

b.-) **Carácter cuantitativo.**- La data adquirida para esta investigación, tiene como fuente las 10 estaciones de monitoreo del aire de propiedad de SENAMHI, ubicados espacialmente en todo el ámbito geográfico de la ciudad de Lima Metropolitana, que estudia el modelo, crean bases de datos numéricos con control de calidad de datos realizados previamente por SENAMHI, ya que se adquiere bajo un costo. Estos datos de cantidad de contaminantes atmosféricos, temperatura, altitud, humedad y velocidad de viento, son ingresados y evaluado por el algoritmo de Stirling y kriging, identifican geo espacialmente dentro del alcance geométrico del modelo 3D, y como resultados de cálculos en iteraciones calculan las concentraciones en todo el ámbito espacial atmosférico establecido por el modelo MDLE.

3.2. Unidad de análisis

3.2.1. Ubicación y ámbito geográfico

La unidad de análisis de esta investigación es el ámbito geográfico espacial ubicado en la ciudad de Lima la misma que tiene una dimensión regional de un paralelepípedo plano de base 67km por 44km y una altitud de 10Km, y los diferentes contaminantes atmosféricos presentes en esta región espacial. Las coordenadas del sistema “Universal Transversal Mercator” - UTM se muestran en la .Tabla No. 01. En el modelo se utiliza específicamente las coordenadas UTM WGS 84.

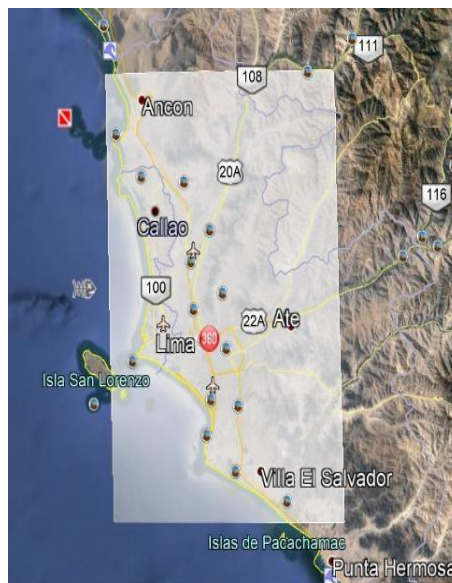
Tabla No. 1: Coordenadas UTM de los puntos superficiales del modelo

Estación	X	Y	Z
E01A00	258772.1	8705786.4	0
E02B00	301776.5	8705786.4	1111
E03C00	304743.5	8641591.4	327
E04D00	260991.1	8641087.4	0

Fuente: Elaboración del autor

La .Figura No. 6 representa la ubicación y el área de estudio en el espacio geográfico de Lima Metropolitana.

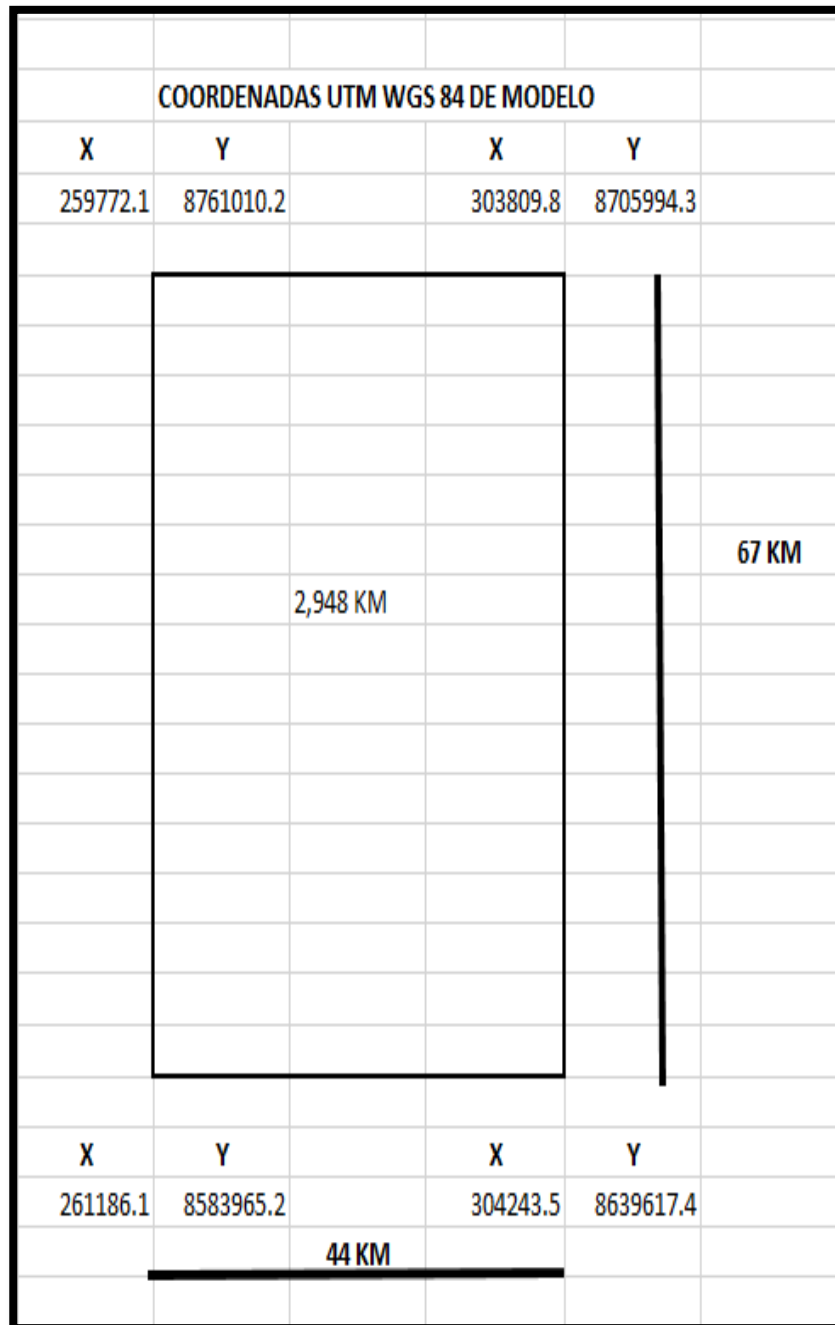
AREA DE ESTUDIO



.Figura 6: Área rectangular del modelo MDLE

Fuente: Elaboración del autor

COORDENADAS DEL AREA DE ESTUDIO



.Figura 7: Coordenadas UTM WGS84, del área superficial del modelo MDLE

Fuente: Elaboración del autor

3.3. Población de estudio

La población de estudio está conformada por las diez estaciones de monitoreo de calidad del aire implementadas por SENAMHI, los mismos que miden automáticamente en forma permanente la concentración de contaminantes atmosféricos los cuales tienen origen o son producido por el hombre como aquellas que se originan en forma natural. Los contaminantes más relevantes son partículas finas, partículas sólidas en suspensión, gases tipos óxidos y gases sulfurados además de los metales pesados en suspensión.

3.4. Tamaño y selección de muestra

El tamaño de la muestra está constituida por la totalidad de las estaciones de medición constituyendo la totalidad del universo del número de estaciones implementadas por SENAMHI, que son puntos de medición continua de cantidad de contaminantes atmosféricos en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en Lima metropolitana, cubren por su ubicación la extensión de la ciudad de Lima.

La selección de la muestra poblacional es entonces todo el universo, representado por las 10 estaciones de medición y seguimiento de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Lima, a partir de los datos diariamente medidos y adquiridos para este estudio, se realizan los cálculos de localización espacial de los contaminantes atmosféricos en todo el ámbito de la ciudad de Lima.

Tabla No. 2: Nomenclatura de las estaciones

No. De orden	Número de la estación en forma creciente de norte a sur	Nombre de la estación de monitoreo de calidad del aire
1	Estación No. 01	Estación Puente Piedra
2	Estación No. 02	Estación Carabaylo
3	Estación No. 03	Estación San Martín de Porres
4	Estación No. 04	Estación San Juan de Lurigancho
5	Estación No. 05	Estación Ate
6	Estación No. 06	Estación Huachipa
7	Estación No. 07	Estación Santa Anita
8	Estación No. 08	Estación Campo de Marte
9	Estación No. 09	Estación San Borja
10	Estación No. 10	Estación Villa María del Triunfo

Fuente: Elaboración del autor

3.5. Técnicas de recolección de datos

Los datos adquiridos para esta investigación cuentan con un control de calidad realizados previamente por personal y equipo técnico de SENAMHI, dichos datos al ser medidos en las diez estaciones de monitoreo debidamente calibradas y sus procedimientos de cuantificación y manejo cumplen con los estándares internacionales de calidad y precisión en la medición aseguran la fiabilidad de los mismos. La .Figura No. 8 muestra la metodología y la técnica en la toma de datos.

Parámetro	Fecha primer registro	Fecha último registro	Metodo	Técnica	Marca	Gráficos
Material Particulado menor a 10 micras (PM10)	03/12/2014	26/06/2020	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC	
Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5)	03/12/2014	26/06/2020	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC	
Dioxido de Azufre SO ₂	03/12/2014	26/06/2020	Automatico	Fluorescencia UV Analizador T100	TELEDYNE	
Oxidos de Nitrogeno NO ₂	03/12/2014	26/06/2020	Automatico	Quimioluminiscencia Analizador T200	TELEDYNE	
Monoxido de Carbono CO	03/12/2014	26/06/2020	Automatico	Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300	TELEDYNE	
Ozono Troposferico O ₃	03/12/2014		Automatico	Fotometria UV Analizador T400	TELEDYNE	

.Figura No. 8. Método y técnica de recolección de datos.

Fuente: SENAMHI

3.6. Validación de datos

La información adquirida de las diez estaciones de SENAMHI, institución estatal encargada de realizar el control de la contaminación del aire a través del monitoreo constante y continuo ofrece los servicios de proveer datos oficiales y validados de estos diez estaciones de monitoreo y medición continua de los elementos contaminantes troposféricos en la ciudad de Lima. La calidad de datos medidos los realiza desde la calibración de sus instrumentos y los métodos de medición con estándares internacionales de calidad, cuyos detalles de la técnica de medición y el instrumento están detallados para partículas en suspensión y gases se muestra en la .Figura No. 8 anteriormente indicado.

3.7. Hipótesis general

El modelo de localización espacial (MDLE), de contaminantes atmosféricos, puede precisar a distintas altitudes, la calidad del aire en Lima

3.8. Hipótesis específicas

1. Los aspectos meteorológicos considerados en el modelo, como la presión, temperatura y velocidad de viento influyen directamente en la calidad del aire en la ciudad de Lima.
2. Las características geográficas en el modelo, se relacionan por la variación de la altitud y relieve topográfico directamente con la calidad del aire en Lima
3. Los algoritmos de Stirling y Kriging en el modelo, contribuye en la ubicación precisa y geo referenciada de las concentraciones de los contaminantes con cuyos datos establecerían la calidad del aire en Lima a distintas altitudes

3.9. Identificación de variables

V₁ Diseño del modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos.

V₂ Calidad de aire en diferentes altitudes de la ciudad de Lima.

Tabla No. 3: descripción de las variables

VARIABLES	INDICADORES
V1: Propuesta del modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos MDLE.	1.1.- Aspectos meteorológicos
	1.2. Condiciones de frontera del modelo.
	1.3. Algoritmos de cálculo de concentraciones de contaminantes en la atmosfera.
V2: Calidad del aire en diferentes altitudes de la ciudad de Lima.	Contenido de contaminantes según modelo y niveles o estado de calidad del aire.

Fuente: Elaboración del autor

3.10. Operacionalización

Tabla No. 4: Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES	INDICES	UNIDAD DE MEDIDA
V1: Propuesta del modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos MDLE.	1.1.- Aspectos meteorológicos	1.1.1. Temperatura 1.1.2. Presión atmosférica 1.1.3. Velocidad de Viento	(°C) (atm) (m/s)
	1.2. Condiciones de frontera del modelo.	1.2.1. Altitud u cota 1.2.2. Distancia este y oeste 1.2.3. Topografía superficial	(m.s.n.m.) (m) (m.s.n.m.)
	1.3. Algoritmos de cálculo de concentraciones de contaminantes en la atmosfera.	1.3.1. Interpolación de Stirling 1.3.2. Iteración de Euler 1.3.4. Regionalización espacial Kriging	(µg/m ³)
V2: Calidad del aire a diferentes altitudes en Lima.	Contenido de contaminantes según modelo y niveles o estado de calidad del aire.	2.1. Partículas PM. 2.2. Óxidos de Nitrógeno NOx 2.3. Óxidos de Azufre SOx. 2.4. Óxidos de carbono COx 2.5. Cantidad de ozono O ₃	(µg/m ³)

Fuente: El autor

CAPÍTULO IV: CALIDAD DE AIRE Y CONTAMINACION ATMOSFERICA

4.1. Generalidades

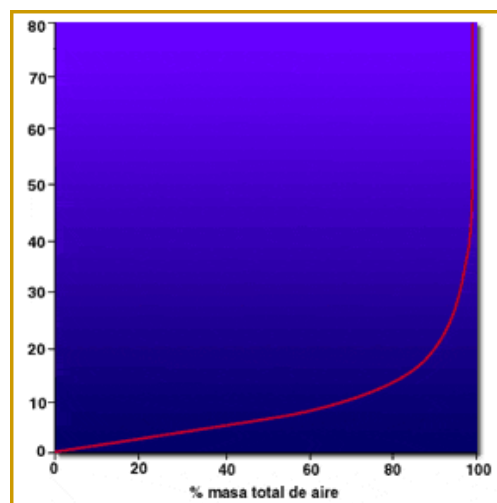
4.1.1. La atmosfera y sus características

a.- Atmosfera

Según la Real Academia española – RAE, se define como atmosfera a la capa gaseosa que envuelve la tierra y a otros cuerpos celestes.

Por otro lado **Cuadrat y Pita (1997)**, afirman que la atmosfera es una capa gaseosa de 10 mil kilómetros de espesor aproximadamente que rodea la litosfera y la hidrosfera. Está compuesta de gases y partículas sólidas en suspensión así como partículas liquidas los cuales son atraídos por la gravedad de la tierra

El mayor porcentaje de la masa atmosférica se encuentra por debajo de los 10 kilómetros de altitud. En la .Figura 9, se observa que a partir de la cota de los 10 kilómetros a más, el monto porcentual de la masa está en un 20%, mientras que el 80% se encuentra en promedio por debajo de los 10 kilómetros.



.Figura No.9: Masa porcentual atmosférica en los 10Km de altitud
Fuente: Cuadrat y Pita, (1997)

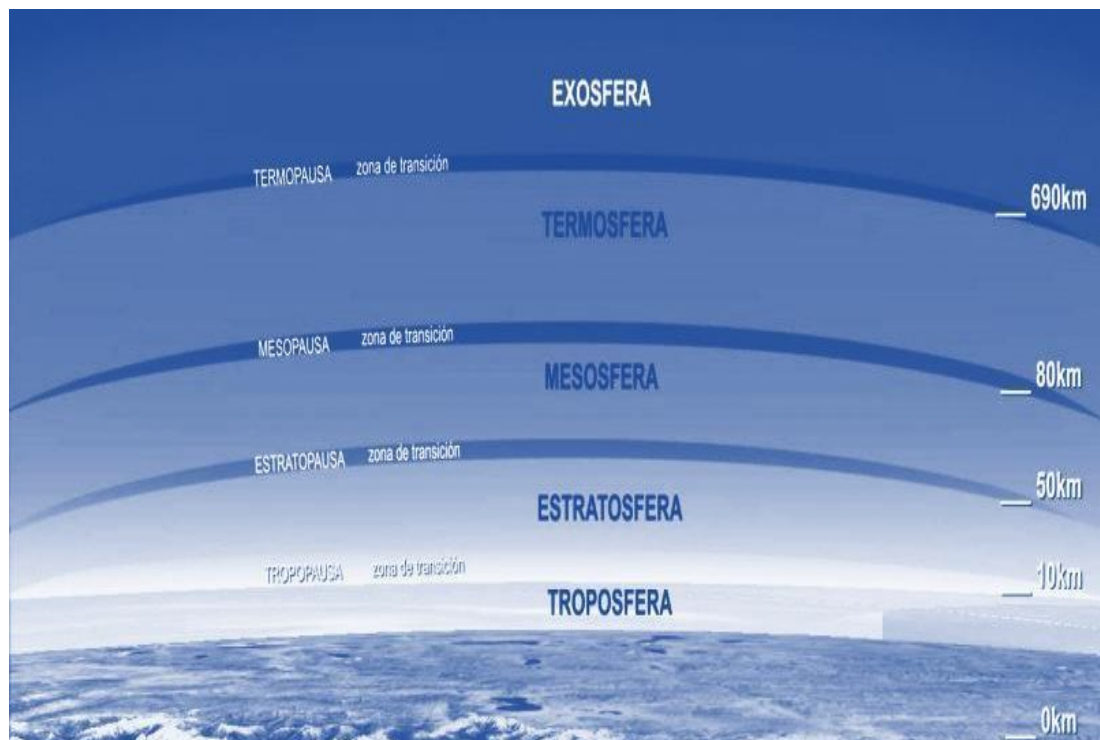
Como se puede observar en la .Figura 9, la atmosfera se subdivide en dos regiones en base a los niveles porcentuales de masa atmosférica, la primera la zona espacial más densa que va de 0 a 10Km. y la segunda zona de 10Km hasta los 80Km donde la masa atmosférica es mínima.

b.- Capas o zonas espaciales de la atmosfera

Según **Estela R., María (2019)**, la atmosfera se subdivide en varias zonas espaciales conocidos también como capas atmosféricas:

- **Tropósfera.** Aquella que está en contacto con la superficie de la tierra, es la parte donde se hace los estudios del aire y su componente y aquí se acumula la mayor parte de los gases en el aire. Su longitud total alcanza los 10 km de altitud, es la zona que tiene mayor temperatura en comparación con las otras zonas de la atmosfera terrestre, aun cuando en sus límites exteriores la temperatura es -50° Celsius.
- **Estratósfera.** La dimensión de la zona espacial, es desde 10km a 50 km de altitud, y posee sub zonas con presencia de elementos de saturacion. Una de ellas es la ozonósfera, donde la radiación solar afecta al oxígeno, formando moléculas de ozono O₃ que conforman la “capa de ozono”.
- **Mesósfera.** Su dimensión varía entre 50 a 80 km., es la zona espacial intermedia de la atmósfera, es la zona de más baja temperatura en la atmósfera, llegando hasta -80° Celsius.
- **Ionósfera o termósfera.** Su dimensión esta entre los 80km hasta los 800 km de altitud, aquí el aire es de bajan densidad, permite oscilaciones de temperatura contrastantes influenciado por la intensidad solar, registra temperaturas de 1500° Celsius durante el día y -80 grados Celsius en la noche.
- **Exósfera.** Es la zona externa de la atmósfera terrestre, se encuentra más allá de los 800 km a los 10.000 km de altitud, allí tienen lugar la fuga de los elementos más livianos de la atmósfera, como el helio o el hidrógeno.

En la .Figura No. 10, mostramos las diferentes zonas espaciales donde podemos apreciar la altitud en relación a la superficie de la tierra.



.Figura 10: Zonas espaciales atmosféricas con longitud media

Fuente: Adaptación del autor

c.- Aspectos físicos de la Atmósfera

En toda la zona espacial de la atmósfera terrestre se observa la presencia de los diversos tipos de gases, salta a la vista que el mayor porcentaje de masa se acumula en los primeros 10 km de altitud, asimismo, casi todos los investigadores coinciden que el 95% del aire se encuentra en esta zona espacial que está en contacto con la superficie de la tierra. Los principales gases presentes en los primeros 80 Kilómetros de la atmósfera son; nitrógeno 78,08%, oxígeno 20,94%, H₂O del 1% al 4%, y a nivel superficial el argón 0,93%. Otros que por su cantidad de saturación son despreciables $m \approx 0$.

La zona espacial comprendida desde los 80 km hacia arriba tiene capas diferenciadas de nitrógeno molecular entre los 80 kilómetros a los 400 km, oxígeno atómico de 400 kilómetros a los 1100 kilómetros, helio desde los 1100 kilómetros a los 3500 kilómetros y finalmente hidrógeno que va desde los 3500 kilómetros hasta los 10 mil kilómetros. Por otro lado, la presión y temperatura atmosféricas decrecen con la altitud, debido a

la caída de temperatura en las capas exteriores que son poco densas, tal como se observa en el gráfico No. 10. Finalmente en la estratósfera (entre 10 a 80 kilómetros de altitud), se encuentra la capa de ozono, motivo por el cual es conocido también como ozonósfera, en esta zona espacial de la atmosfera se encuentra una saturación densa de O_3 que obstruye la radiación solar a la superficie de Lima. Asimismo, los gases presentes en esta zona y aquella que se encuentra entre los 10 primeros kilómetros forma una barrera de rápida dispersión del calor hacia el espacio, conocido como “efecto invernadero”.

El presente estudio se desarrolló en la zona espacial conocido como troposfera que tiene un rango de altitud que va desde 0 a 10 kilómetros y es la zona donde la masa atmosférica se encuentra en un 80% de toda la atmosfera.

4.1.2. El aire y sus componentes

Según la Real Academia española – RAE, se define como un que se constituye como parte de la atmosfera de la tierra, con componentes principales de oxígeno y nitrógeno, además de otros componentes en menor cantidad como el anhídrido carbónico y moléculas de H_2O , transparente, incoloro, inodoro e insípido; sin volumen definido.

Según el (Minan, 2019) el aire es una mezcla de diferentes tipos de gases, que forma la atmósfera de la Tierra y considera que el aire puro, que se encuentra alrededor de la Tierra tiene la siguiente composición volumetrica:

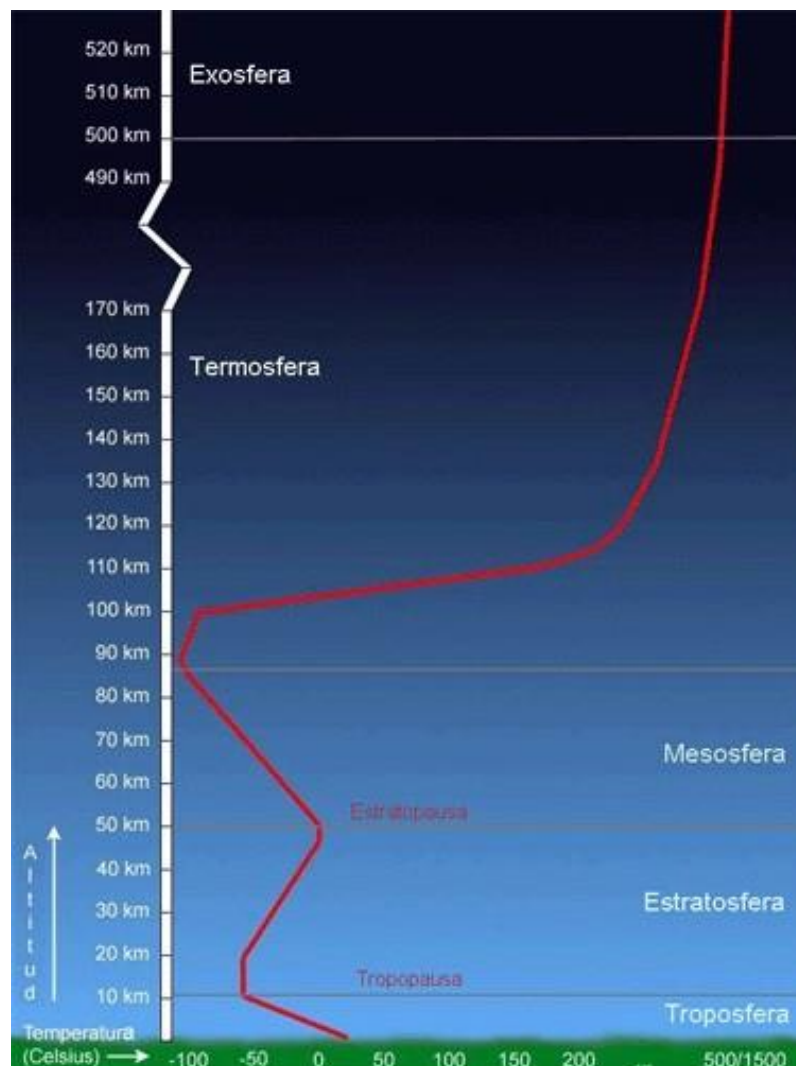
Tabla No. 5: Principales componentes de aire

COMPONENTES	(%)
Nitrógeno- N_2	78
Oxígeno- O_2	21
De menor cuantía	1

Fuente: Elaboración del autor

Aparte de los gases mostrados en la .Tabla No. 5, existen otros gases que componen el aire entre ellos podemos indicar a los elementos de los gases nobles al Argón, Neón, Helio, Criptón, Xenón, Hidrógeno, Metano, y compuestos como el Óxido nitroso y vapor de agua cuya composición varía entre 0.5 y 4 %, además de estos también se

encuentra el ozono en la zona espacial denominado troposfera (ozono troposférico), y partículas sólidas en suspensión. Estas partículas sólidas existen como parte del aire en dicha zona espacial de la troposfera, compuestos esencialmente por polvo arrastrado de la superficie de la tierra y cenizas volcánicas. Son por lo general menores a 10 micrómetros de diámetro. La .Figura No. 11, se muestra se muestra la zona donde se encuentran estos componentes del aire así como la variación de la temperatura según va cambiando las zonas espaciales.



.Figura 11: Longitudes de la troposfera donde se ubica el aire
Fuente: Adaptado del Ingeominas, Colombia (2010).

Se aprecia en la .Figura 12, la región del ozono el cual se encuentra en la zona espacial conocido como estratósfera es el escudo protector de la tierra frente a la radiación ultravioleta proveniente del sol, mientras que en la zona espacial denominado tropósfera, el ozono forma parte del

aire, y se presenta como smog. En la troposfera, que es el, primer nivel de la atmósfera, es donde ocurre, en su mayoría los fenómenos meteorológicos, como lluvia, granizada, tormenta eléctrica, vientos y, todos los fenómenos climáticos.

4.1.3. Componentes nocivos en el aire

El aire se contamina cuando el equilibrio de las sustancias que componentes, son alteradas, tornándose en una mezcla de partículas sólidas y gases en el aire.

a. Factores que alteran el equilibrio de los componentes básicos del aire

Entre ellos, destacan, la temperatura, la dirección vectorial de velocidad del viento y la altitud, son las principales causas para el incremento de la concentración de los elementos contaminantes del aire.

b. Gases de efecto invernadero en el aire

Estos gases que se muestran en la .Tabla No. 6, son el CO₂, producto de la combustión, el NO₂, el CH₄, que se origina durante la explotación de hidrocarburos. La presencia de estos gases elevan la temperatura de la Tierra, y se calcula en promedio de 3.5 °C de incremento en el último siglo, y producirá que será la causa de las alteraciones de los ecosistemas.

Tabla No. 6: Principales gases de efecto invernadero

Óxido Carbonico	.CO ₂
GAS_Metano	.CH ₄
Óxido Nitroso	.NO ₂

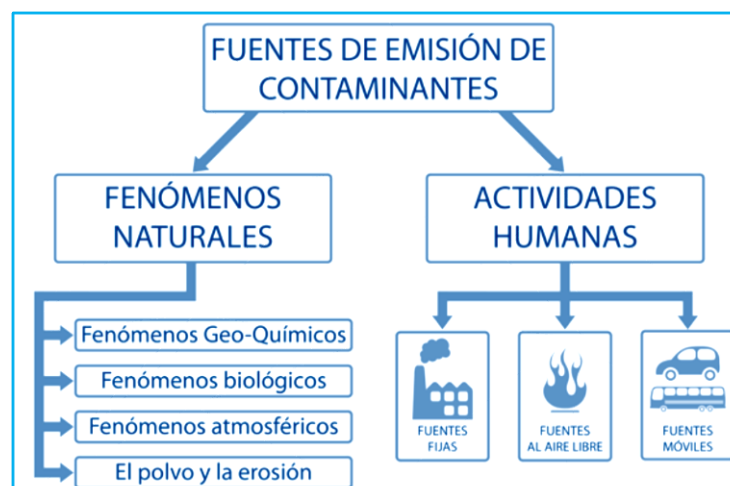
Fuente: Elaboración del autor

La .Figura No. 11. Muestra la tendencia natural que tiene la temperatura del aire al disminuir en relación con la altitud a nivel de la troposfera, el mismo que parte de una media de 14°C, a -50°C, con intervalos de 0.64 a 1°C, cada 100 metros de elevación; hoy esta razón numérica, se encuentra en un decremento de 1.5 a 2.1 grados Celsius por una longitud de 100 metros.

c. Eliminación del O₃

Proviene de la reacción de una media de 90 productos químicos que al llegar a la estratosfera, eliminan al ozono. Entre estos gases los principales son: Clorofluorocarbonos-CFC, Hidrofluorocarbonados-HFC, Halones, Bromuro de metilo, Tetracloruro de carbono, Hidrobromofluorocarbonos, Metilbromuro y Bromoclorometano.

La .Figura No. 12, esquematiza la alteración del equilibrio de la concentración de los elementos que componen el aire y algunos de ellos pasan a ser elementos contaminantes al incrementarse su concentración además de la introducción a la atmosfera sustancias gaseosas o solidas que no son componentes originales del aire y son producidas principalmente por la actividad del hombre.



.Figura 12: Proceso de alteración de componentes del aire

Fuente: Minan, 2019.

d. Fuentes que incrementan la concentración de elementos contaminantes en el aire.

Los Vehículos motorizados, por el uso de hidrocarburos, emitiendo diversos gases como (CO, NO₂, SO₂), así como el plomo y partículas PM_x a la atmósfera. El plomo (Pb) como elemento de contaminación del aire por estar presente en los hidrocarburos. Asimismo están como principales focos de origen de elementos nocivos del aire las fábricas, fundiciones, combustión de basura, y causas naturales como la erosión de los suelos.

4.1.4. Calidad del aire

Son seis los elementos contaminantes del aire, tal como se aprecia en el ítem 4.1.3, de todos los componentes nocivos del aire, destacan 6 contaminantes principales.

1.- Partículas en suspensión PM₁₀.- Se encuentra en forma de polvo fino que capaz de impregnarse en las paredes superficiales y tienen un diámetro menor a 10 micrómetros, motivo por el cual se le conoce como PM₁₀.

2.- Partículas en suspensión PM_{2.5}.- Son partículas más pequeñas de 2.5 micras de tamaño su presencia es debido a motivos naturales y antrópicas.

3.- Dióxido de Azufre SO₂.- También conocidos como SO_x, de propiedad incolora, residuo de la combustión de hidrocarburos. El SO₂ daña el sistema respiratorio, sus efectos se potencializan al combinarse con partículas o la humedad del aire.

4.- Dióxido de nitrógeno NO₂.- Conocido como NO_x, de manera antropogénica. El NO₂ penetra las regiones más profundas de los pulmones. Las fuentes en la naturaleza son la descomposición de nitratos orgánicos y las erupciones de los volcanes.

5.- Ozono O₃.- El ozono, es invisible, esta en la **troposfera** donde se forma por la reacción química de óxido nítrico NO₂ y los compuestos orgánicos volátiles-COV, más la energía de la luz solar. El Ozono se encuentra en la estratosfera y es la causante de la reflectancia de la radiación UV.

6.- El CO.- Es incoloro e inodoro y en altas concentraciones puede ser letal, se origina por la combustión incompleta de hidrocarburos, otras fuentes de CO aportantes de este elemento es el humo de cualquier material producido en el proceso de quemado.

4.2. Indicador de calidad de aire

4.2.1. Indicador ICA

El índice de calidad del aire – ICA, en su forma original, representado por la .Figura No. 13, muestra la evolución inicial de los indicadores en el Perú.

Índice de calidad del aire (ICA)	PM ₁₀ (µg/m³)	SO ₂ (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)
	24h	24h	1h	8h
0 – 50	0 - 50	0 - 20	0 - 40	0 - 60
>50 – 100	>50 - 150	>20 - 80	>40 - 200	>60 -120
>100 – 200	>150 - 250	>80 - 500	>200	>120
>200 – 300	>250 - 420	>500 - 2500		
> 300	>420	>2500		

.Figura No.13: Índice de calidad de aire - ICA
Fuente: Minam 2008, adaptado de EPA y D.S. 003-2008

En base a la .Tabla anterior, si las concentraciones de los contaminantes en el aire resultan mayores a las establecidas por el Índice de calidad de aire ICA, los niveles se clasifican en Bueno, Moderado, Malo, Muy malo y alerta máxima que se ve en el color morado.

Estado de calidad del aire	ICA	Efectos en la salud	Acciones preventivas
Bueno	0 a 50	No hay riesgos en la salud	
Moderado	>50 a 100	Las personas de los grupos sensibles pueden presentar síntomas como tos y cansancio	
Malo	>100 a 200	La población puede padecer síntomas como tos seca, ojos cansados, ardor en la nariz y garganta	Reducir el esfuerzo físico y el trabajo pesado al aire libre
Muy malo	>200 a 300	Toda la población puede presentar agravamiento de los síntomas como tos seca, ojos cansados, ardor en la nariz y garganta	Evitar cualquier esfuerzo físico al aire libre
Alerta máxima	>300 a 500	Toda la población puede padecer riesgos graves y manifestaciones de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Aumento de las muertes prematuras en personas de los grupos más sensibles.	Evitar cualquier actividad al aire libre

.Figura No. 14 Estados de calidad de calidad de aire ICA
Fuente: Minam 2008, adaptado de EPA y D.S. 003-2008

4.2.2. Niveles de concentración y calidad de aire

Propuesto en el año 2015 por el Ministerio del Ambiente, organismo encargado en temas de calidad del aire y afines.

El INCA es calculado por el Minam para representar y asignar un rango cualitativo del aire. Los valores del INCA se calculan tomando como referencia los Estándares de Calidad del Aire – ECA mostrado en la .Figura No. 16 del cual se toma el valor del rango final y de la .Tabla 15.

Tipos de alerta	Material particulado (PM ₁₀)		Dióxido de azufre (SO ₂)		Monóxido de carbono (CO)	
	µg/m ³	Periodo	µg/m ³	Periodo	µg/m ³	Periodo
Cuidado	> 250	Promedio aritmético 24 horas	> 500	Promedio móvil 3 horas	> 1500	Promedio móvil 8 horas
Peligro	> 350	Promedio aritmético 24 horas	> 1500	Promedio móvil 2 horas	> 2000	Promedio móvil 8 horas
Emergencia	>420	Promedio móvil 8 horas	> 2500	Promedio móvil 90 minutos	> 35000	Promedio móvil 8 horas

.Figura No. 15: Valores de alerta nacional para calidad de aire

Fuente: Minam 2005

Contaminante	Periodo	Forma del estándar				Vigencia	Método del análisis
		µg/m ³	ppb 25° C 1 atm	ppm	Formato		
SO ₂	anual	80	30.6	0.03	Media aritmética, NE más de 1 vez al año	Vigente	Fluorescencia UV
	24 h	20	7.7	0.01		Enero 2014	
PM ₁₀	24 h	150	-	-	NE más de 3 veces al año	Vigente	Separación inercial/filtración (gravimetría)
	Anual	50	-	-	Media aritmética anual	Vigente	
PM _{2.5}	24 h	50	-	-		Enero 2010	Separación inercial/filtración (gravimetría)
	Anual	-					
	24 h	25	-	-		Vigente	
CO	1 h	30000	26100.0	26.1	NE más de una vez al año	Vigente	Infrarrojo no dispersivo
	8 h	10000	8700.0	8.7	Promedio móvil	Vigente	
NO ₂	1 h	200	106.4	-	NE más de 24 veces al año	Vigente	Quimioluminiscencia
	Anual	100	53.2	-	Media aritmética anual	Vigente	
O ₃	8 h	120	61.2	-	NE más de 24 veces al año	Vigente	Fotometría UV

.Figura No. 16 Estándar de calidad de aire ECA

Fuente: Minam 2008

A partir de las .Tablas 15 y 16, tanto el ECA y el INCA se dividen en 4 categorías. El verde significa aire bueno, el amarillo representa aire moderado, el anaranjado aire mala y finalmente el rojo indica que el aire se encuentra en alerta.

La .Figura No. 17, esquematiza lo indicado anteriormente.

	Estado de la calidad del aire	Riesgo	Recomendaciones
	BUENA	La calidad del aire se considera satisfactoria y no representa ningún riesgo.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA para el aire. Puede realizar actividades al aire libre.
	MODERADA	Las personas de los grupos sensibles (niños, tercera edad, embarazadas, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas) podrían experimentar algunos síntomas respiratorios adversos.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para los grupos vulnerables.
	MALA	Las personas de los grupos sensibles podrían experimentar daños a la salud. La población en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
	UMBRAL DE CUIDADO	Toda la población puede verse afectada en la salud.	Implementar estados de alerta.

.Figura No. 17: Clasificación del estado de calidad del aire

Fuente: Minam 2015

4.2.3. Niveles de concentración y tipo de aire

El de aire es establecido en un rango de variación numérica basado en los valores de las concentraciones en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), para cada uno de los elementos contaminantes, para el caso de las partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , las .Figuras 18 y 19 muestran la relación existente entre los valores de concentración de estas partículas con el estado del aire como “buena”, “moderado”, “mala”, y “umbral de cuidado” con los rangos de calidad asignada.

Índice de calidad del aire		PM _{2.5}
		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	0 - 50	0 - 12.5
	51 - 100	12.6 - 25
	101 - 500	25.1 - 125
	>500	>125

Fuente: Resolución Ministerial 112-2015-MINAM

.Figura No. 18: Rango de valores para PM_{2.5}

Fuente. Minam (2015)

Índice de calidad del aire		PM ₁₀
		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	0 - 50	0 - 75
	51 - 100	76-150
	101 - 167	151-250
	>167	>250

Fuente: Resolución Ministerial 112-2015-MINAM

.Figura No. 19: Rango de valores para PM₁₀

Fuente. Minam (2015)

Los rangos de valor para partículas PM₁₀ y PM_{2,5}, en relación a los elementos contaminantes indicados se presentan en la .Figura No. 20.

Material particulado (PM ₁₀) promedio 24 horas		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0-50	0-75	$I (PM_{10}) = [PM_{10}] * 100/150$
51-100	76-150	
101-167	151-250	
> 167	> 250	

Material particulado (PM _{2,5}) promedio 24 horas		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0-50	0 -12,5	$I (PM_{2,5}) = [PM_{2,5}] * 100/25$
51-100	12.6-25	
101-500	25,1-125	
> 500	>1 25	

Dióxido de azufre (SO ₂) promedio 24 horas		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0-50	0-10	$I (SO_2) = [SO_2] * 100/20$
51-100	11-20	
101-625	21-500	
> 625	> 500	

Dióxido de nitrógeno (NO ₂) promedio 1 hora		
Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0-50	0-100	$I (NO_2) = [NO_2] * 100/200$
51-100	101-200	
101-150	201-300	
> 150	> 300	

.Figura No. 20: Calculo de rangos de valor por elemento contaminante

Fuente: Minam 2014

4.2.4. Rangos de concentración de calidad de aire

Los rangos que se establecen a partir de la .Tabla anterior son;

Para PM₁₀

INCA	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$
BUENA	0-75
MODERADA	76-150
MALA	151-250
VUEC*	> 250

.Figura No. 21: Cálculo de rangos de valor para PM₁₀ y su relación con INCA

Fuente: Minam 2014

Para PM_{2.5}

INCA	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$
BUENA	0-12,5
MODERADA	12.6-25
MALA	25.1-125
VUEC*	>125

.Figura No. 22: Cálculo de rangos de valor para PM_{2.5} y su relación con INCA

Fuente: Minam 2014

Por otro lado, la media anual o diaria lo establece el Minam según la .Tabla siguiente:

Tabla No. 7: Valor medio de partículas en suspensión

Partícula en suspensión	Promedio en el tiempo
PM _{2.5}	10 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ media anual 25 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ media de 24 horas
PM ₁₀	20 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ media anual 50 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ media de 24 horas

Fuente: Adaptación de datos del Minam

Para PM₁₀. El ECA (2008), elaborada por el Minan en el año 2008, establece que, para las partículas PM₁₀, los valores promedios según duración debe ser 150 µg /m³ en 24 horas de medición y 50 µg /m³ la media anual, la Organización Mundial de la Salud OMS, (2005), establece 50 µg /m³ como promedio en 24 horas y 20 µg /m³ como promedio anual.

Para PM_{2.5}, El mismo estándar de calidad del aire ECA, (2008), elaborada por el Minan en el mismo año, establece que, para las partículas PM_{2.5}, los valores promedios según duración debe ser 25 µg /m³ en 24 horas de medición y 10 µg /m³ la media anual, mientras que la Organización Mundial de la Salud OMS, (2005), establece 25 µg /m³ como promedio en 24 horas y 10 µg /m³ como promedio anual, tal como se muestra en la .Tabla siguiente, donde solo para las partículas PM_{2.5} hay una diferencia de 10 unidades.

.Tabla No. 8: Comparación de valores medios para partículas

Partícula en suspensión	Promedio en el tiempo
PM _{2.5} -MINAN	10 µg /m ³ promedio x año. 25 µg /m ³ promedio x 24 horas.
PM ₁₀ -MINAM	20 µg /m ³ promedio x año. 50 µg /m ³ promedio x 24 horas.
PM _{2.5} -OMS	10 µg /m ³ promedio x año. 20 µg /m ³ promedio x 24 horas.
PM ₁₀ -OMS	20 µg /m ³ promedio x año. 50 µg /m ³ promedio x 24 horas.

Fuente: Elaboración propia

Para Dióxido de azufre SO₂

INCA	Concentración µg/m ³
BUENA	0-10
MODERADA	11-20
MALA	21-500
VUEC*	> 500

.Figura No. 23. Cálculo de rangos de valor para SO₂

Fuente: Adaptación de datos del Minam

Por tener una vida media relativamente corta en el espacio atmosférico, el SO₂, entre 2 a 4 días, se encuentra casi limitada de ellas en la superficie terrestre, y la otra mitad se transforma en iones de sulfato SO₄ (-), y al contacto con el aire se reduce a trióxido de azufre, que al disolver en agua, este ion, es el catalizador de las lluvias ácidas así como también en sales. La comparación entre el ECA del Minam y la OMS se muestra en la siguiente Tabla.

.Tabla No. 9: Comparación de valores para SO₂

Gas contaminante	Promedio en el tiempo
SO ₂ – ECA Minam	20 µg /m ³ media anual 80 µg /m ³ media de 24 horas
SO ₂ - OMS	500 µg /m ³ media para 10 minutos 20 µg /m ³ media de 24 horas

Fuente: Elaboración propia

Para Dióxido de nitrógeno NO₂

INCA	Concentración µg/m ³
BUENA	0-100
MODERADA	101-200
MALA	201-300
VUEC*	>300

.Figura No. 24. Cálculo de rangos de valor para NO₂

Fuente: Adaptación de datos del Minam

El nitrógeno es el elemento que se encuentra en mayor abundancia al 78 %, y presenta grupos de NO_x , el NO ; es relativamente inofensivo, pero el NO_2 , causar efectos dañinos en la salud. La comparación entre el ECA del Minam y la OMS se muestra en la siguiente .Tabla.

.Tabla No. 10: Comparación de valores para NO_2

Gas contaminante	Promedio en el tiempo
NO_2 –ECA Minam	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x año 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x 1 hora
NO_2 -OMS	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x año 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media x 1 hora

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la .Tabla anterior, ambas entidades especializadas en temas de calidad de aire coinciden en cuanto a las concentraciones medias para este elemento contaminante en el aire al establecer la media para un tiempo de medición de una hora, sin embargo, para el promedio anual hay una diferencia de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la medición de ECA Minam más que la medición que presenta la OMS.

Para el Ozono O_3 .

Para este elemento el ECA del Minam establece el valor medio en 8 horas de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la OMS establece 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8 horas, ninguno de ellas establece una media anual. Aquí se observa una diferencia de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración adicional en el ECA Minam respecto al valor de la OMS.

.Tabla No. 11: Comparación de valores para O_3

Gas contaminante	Promedio en el tiempo
O_3 – ECA Minam	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media para 8 horas
O_3 - OMS	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media para 8 horas

Fuente: Elaboración propia

4.3. Modelos de basados en expresiones matemáticas

La medición de los niveles de calidad del aire es compleja, debido a la presencia de grandes cantidades de factores que influyen en su cálculo, por esa razón, se hacen a través de diferentes modelos de medición de calidad de aire. Los modelos son complejos y tienen el propósito de describir el estado de la atmósfera a su nivel molecular, por representaciones sintetizadas en expresiones matemáticas. Los modelos relacionados a la investigación del comportamiento de los contaminantes en el aire están aquellos denominados Gaussianos, Eulerianos, Lagrangeanos o la combinación en la aplicación en forma mixta.

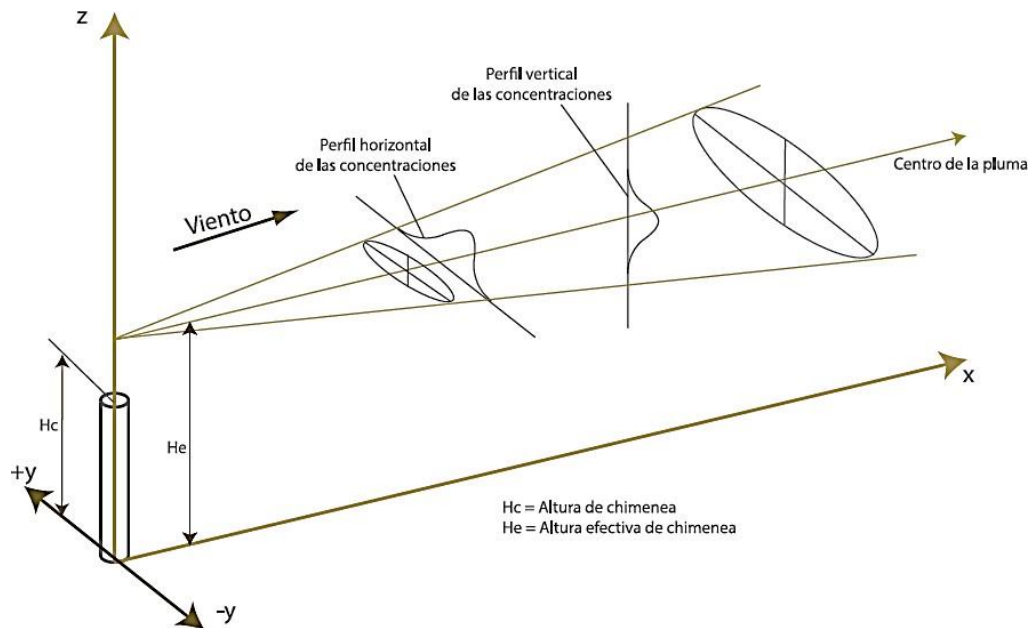
4.3.1. Modelos con base Gaussiana

Este modelo tiene una dependencia importante a la fuente de emisión continua con una condición típica del foco emisor, el mismo que la posición geográfica observe un viento con dirección paralela al eje x., con una pluma de origen en la misma fuente y, esta pluma, también se desplaza en la dirección del viento. Asimismo, dentro de la pluma la distribución de los contaminantes cumple la distribución Gaussiana. La velocidad del viento tiene, una medición directa, sin existir medición para la estabilidad atmosférica, lo que implica una estimación a través de relaciones empíricas, basado en lecturas de temperatura, variables de viento y cobertura climatológica.

Algunas condiciones de frontera para este modelo se establece como:

1. Considerar contante a las emisiones, en el periodo de la evaluación, esta condición, es conocido también como estado estacionario:
2. Los parámetros meteorológicos en el periodo de evaluación tienen el carácter de constante.
3. Finalmente, la dirección y velocidad del viento con carácter homogéneo y horizontal, es decir, el viento es representativo para todo el dominio.

La .Figura siguiente nos muestra el esquema geométrico básico de un modelo Gaussiano, donde se puede visualizar los parámetros que utiliza en el proceso de cálculo, así como la proyección cónica de la dispersión de componentes en el aire.



.Figura 25: Esquema conceptual del modelo Gaussiano.

Fuente: Adaptación de Servicio Ambiental Chile,(2019)

En la .Figura 25. Observamos la característica constante de sus parámetros; por tanto, este modelo, calcula la dispersión con las siguientes parámetros, una altitud efectiva H_e , que es siempre mayor que la altitud real de H_c .

4.3.2. Modelos con base Eulereana

Estos modelos, tratan de incluir la gran mayoría de los procesos atmosféricos y su complejidad. Dentro de esos procesos en el espacio atmosférico sobre todo los procesos físicos y procesos químicos conjuntamente con la dispersión. La mayor parte de los procesos se describen con ecuaciones matemáticas, su característica, es netamente matemático al tratar los procesos físicos y químicos. Estas relaciones matemáticas, son ecuaciones diferenciales en (x,y,z) . El modelo, también utiliza algoritmos numéricos y, de esta manera, describe la evolución espacial de la atmósfera en (x,y,z) .

4.3.3. Modelos con base Lagrangeana

Basado en el movimiento del aire o de una partícula en la atmósfera, desde una posición X_i hasta X_f . con el cual, fácilmente calcula, la dirección de la partícula, en un intervalo de tiempo finito. Así, establece la trayectoria que describe dicho punto a través de esa integración finita. El cálculo de la trayectoria entrega la información sobre el destino de la contaminación, para el cálculo de las cantidades de los elementos contaminantes, realiza el mismo proceso para muchas trayectorias, y, con la ayuda de algoritmos y ordenadores estima esta variable.

El requerimiento principal para el uso de los modelos Lagrangeanos es la disponibilidad de datos meteorológicos tetra-dimensionales, donde se incluyen las dimensiones X,Y,Z y en el espacio y el tiempo t.

4.3.4. Modelo MDLE

Este modelo es la que proponemos en este trabajo de investigación, sus características a diferencia de los modelos descritos el MDLE realiza los procesos de cálculo utilizando el algoritmo geoespacial de Kriging para realizar los cálculos de las concentraciones, donde hace uso la técnica del elipsoide 3D que le permite encontrar los valores georreferenciados de concentraciones correspondientes a los seis elementos contaminantes del aire, los cuales son las $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_x , NO_x , O_3 , y CO. Asimismo mediante el algoritmos de Stirling realiza la interpolación de los valores en forma unidimensional adquiridas de cada uno de las diez estaciones de medición del SENAMHI hasta una altitud de los diez mil metros.

El modelo MDLE, incluye como ingreso de datos (INPUT), los resultados de dispersión del modelo Gaussiano en los puntos de origen de medición de cada estación de medición, para el cual, considera las coordenadas UTM de ubicación de dichas estaciones de medición y utilizando el factor de corrección alfa (α), relacionado a la altitud de medición (originalmente 10m) el mismo que toma el valor de quinientos metros.

Los pasos del proceso por el modelo MDLE son

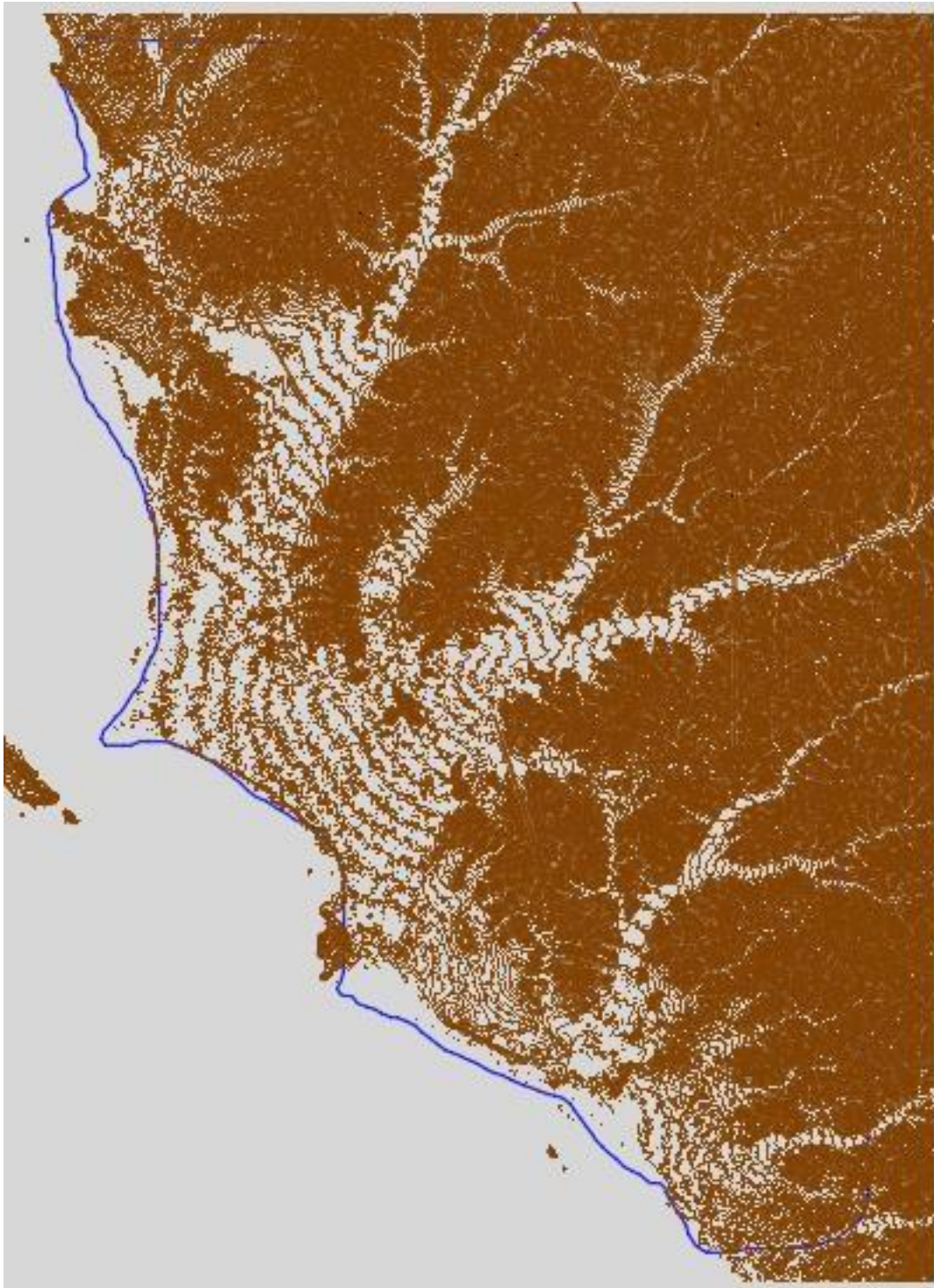
1. Adquisición de datos con control de calidad del SENAMHI
2. Calculo de dispersión horizontal de concentraciones de los elementos contaminantes con el modelo gaussiano a quinientos metros de altitud de la superficie.
3. Interpolación de valores de las concentraciones de los contaminantes hasta una altitud de diez mil metros de altitud, con el algoritmo de Stirling.
4. Interpolación geoespacial de valores de las concentraciones a través del algoritmo de Kriging, en el espacio 3D del alcance del modelo.

CAPÍTULO V: MODELO DE LOCALIZACION ESPACIAL - MDLE

5.1. Aspectos topográficos y climáticos

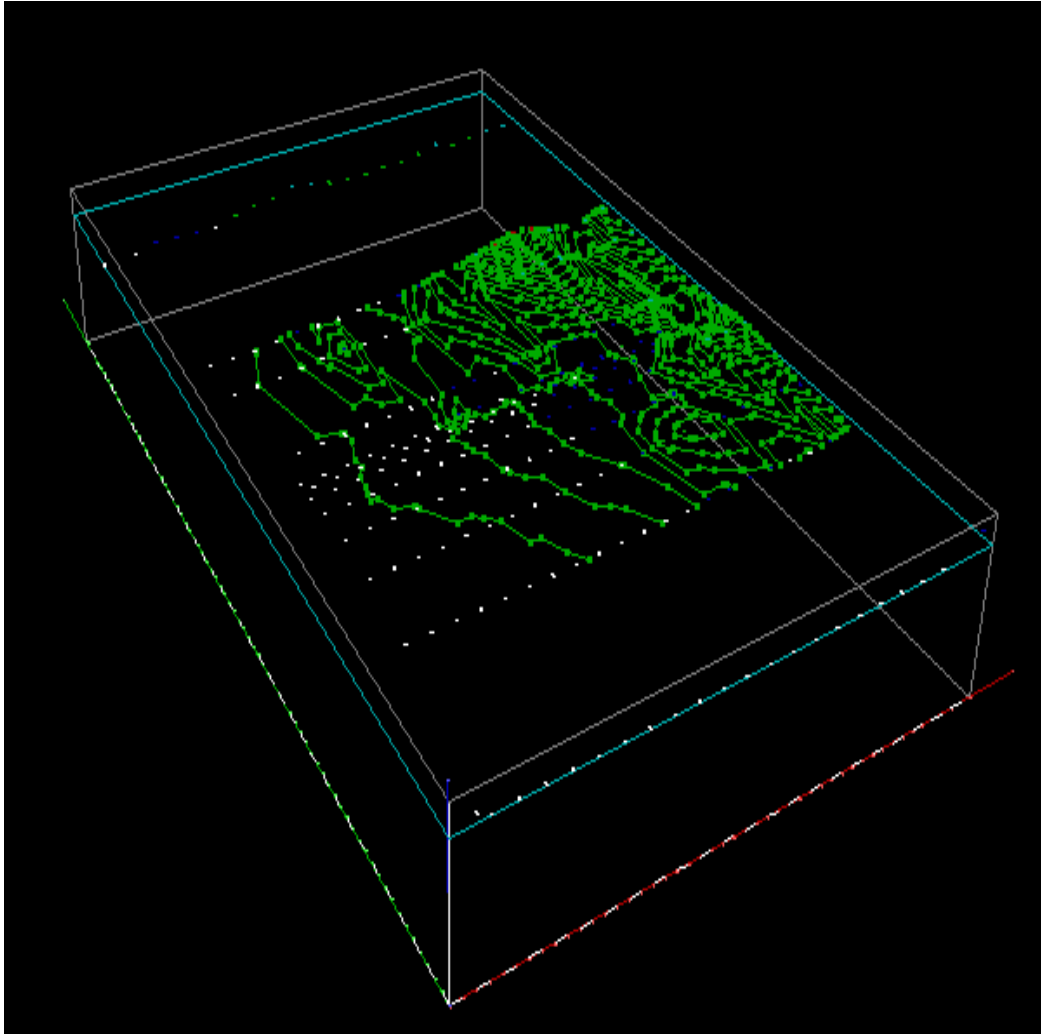
5.1.1. Topografía

La topografía del área de estudio es la superficie que se encuentra en el ámbito del modelo, es decir, el plano topográfico superficial de Lima Metropolitana, donde una de las características relevantes es que sus ejes norte y este se encuentran en coordenadas UTM, medidas en el sistema métrico, estos ejes, se relacionan con las coordenadas X,Y del modelo, más la altitud que es conocido como la altitud sobre el nivel del mar o cota, que en el modelo tiene su denominación de Eje Z o coordenada Z, cuya unidades de medida es el metro. La .Figura siguiente muestra las curvas de nivel de la superficie topográfica que se encuentra dentro del ámbito del modelo.

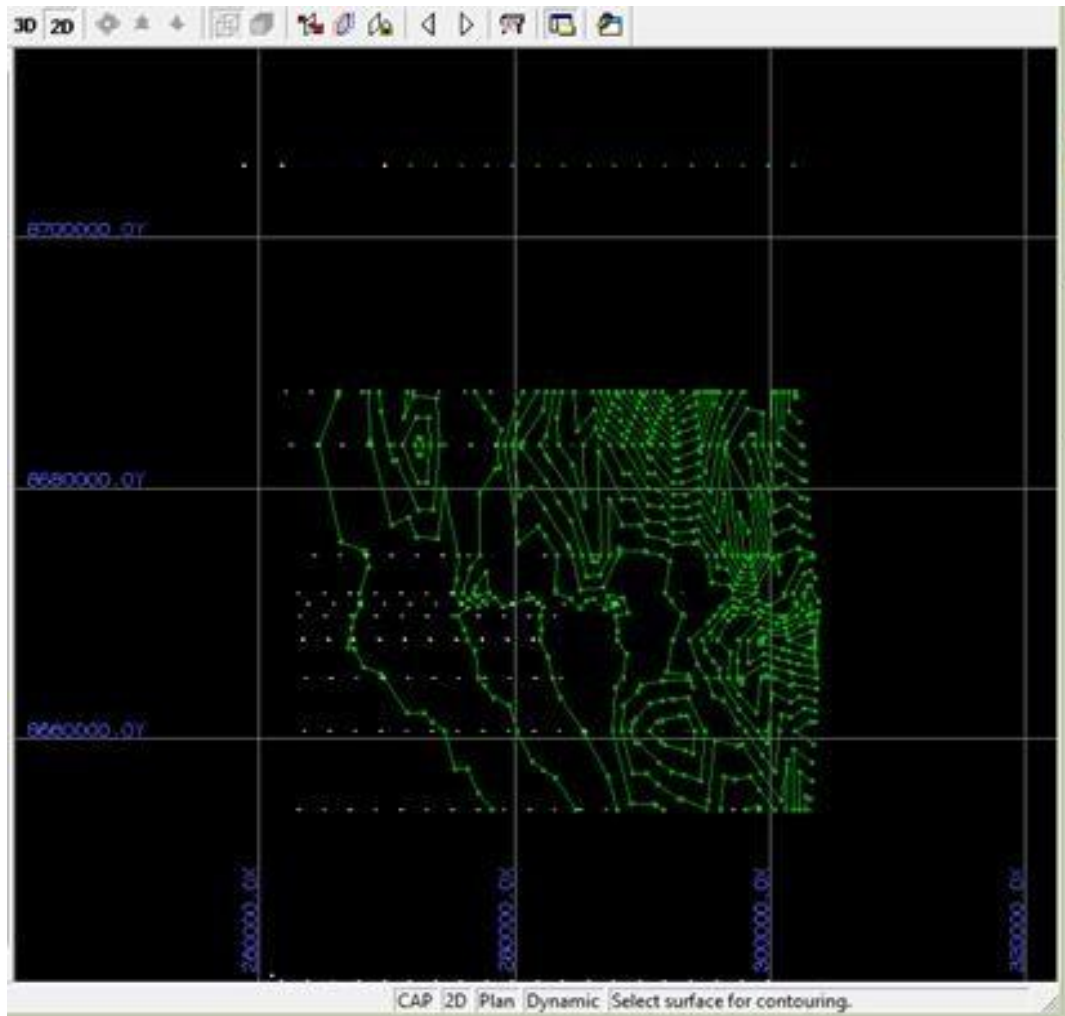


.Figura No.26: Curvas de nivel de la superficie topográfica del modelo
Fuente: Elaboración del autor

Las siguientes .Figuras muestran la topografía en el modelo 3D y 2D respectivamente.



.Figura No.27: Curvas de nivel 3D de la superficie topográfica del modelo
Fuente: Elaboración del autor

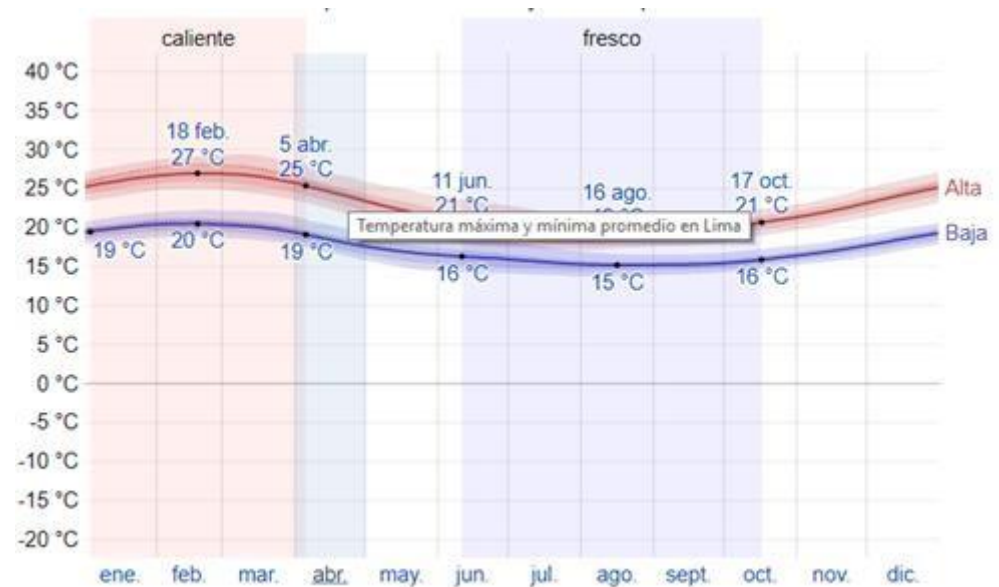


.Figura No.28: Curvas de nivel 2D de la superficie topográfica del modelo
Fuente: Elaboración del autor

5.1.2. Clima

Los parámetros climatológicos o meteorológicos que el modelo considera como variables principales son la presión en atmosferas, temperatura en grados absolutos o kelvin, la velocidad promedio del viento en metros por segundo y finalmente la dirección promedio del viento en la región costa correspondiente al ámbito topográfico del modelo.

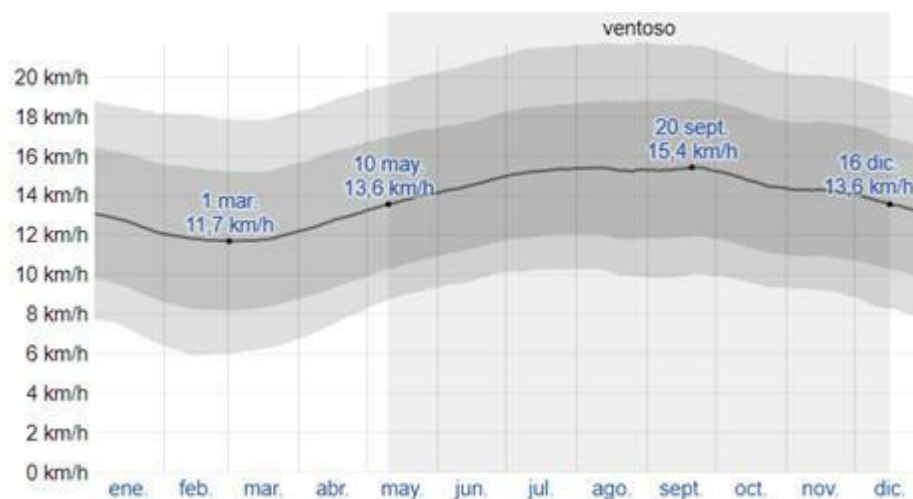
Temperatura, la temperatura ambiental que el modelo ingresa como datos son aquellas que se adquieren de SENAMHI correspondiente al mes de agosto del 2018, se esquematiza en la .Figura 29.



.Figura 29: Temperatura mínima y máxima en Lima

Fuente: SENAMHI ,(2018)

Velocidad y dirección de viento, esta es otro de los parámetros que el modelo MDLE considera entre sus variables, al igual que para la Temperatura, se considera el promedio anual en el mes de agosto del 2018 y sus unidades están en m/s para la velocidad y la dirección se expresa en grados, minutos y segundos sexagesimales respecto al eje sur – norte, cuyo promedio anual de orientación se observa en la .Figura adjunta. La medición se ha realizado a 10 metros sobre la superficie terrestre, la época con mayor carga de ventarrones del año es entre Mayo a Diciembre todo los años, con velocidades promedio del viento de más de 3.7 metros por segundo, el mes donde la velocidad del viento llega a su máxima valor es en setiembre con un valor promedio de velocidad del viento de 4,3 metros por segundo. Tal como muestra la siguiente .Figura.



.Figura 30: Velocidad promedio del viento en Lima

Fuente: SENAMHI , (2018)

La dirección del viento, promedio en la ciudad de lima es de sur a norte, con inclinaciones respecto al eje sur norte de 60 a 90 grados sexagesimales hacia el oeste, tal como se muestra en la siguiente .Figura.



Figura N. 31: Dirección promedio de viento en Lima
Fuente: SENAMHI , 2018

Presión atmosférica, los valores de la presión atmosférica varían según la cota o altitud respecto al nivel del mar, en este sentido en el modelo MDLE consideramos esa variación que está representando en la siguiente .Figura.

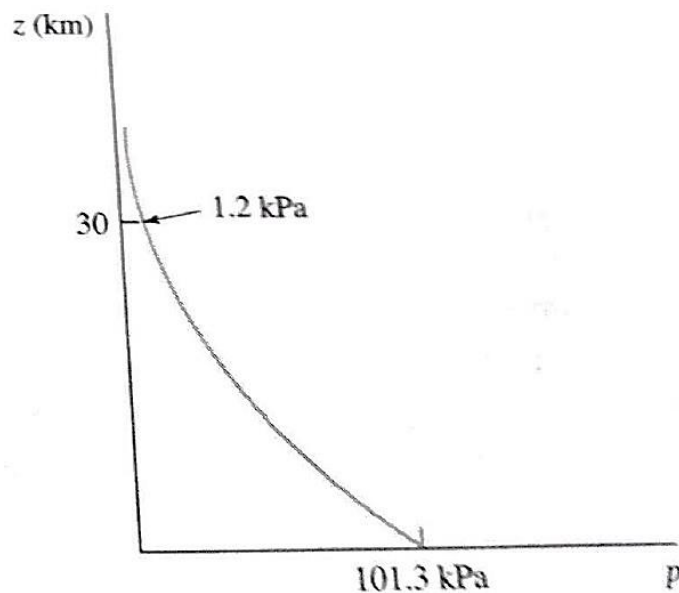
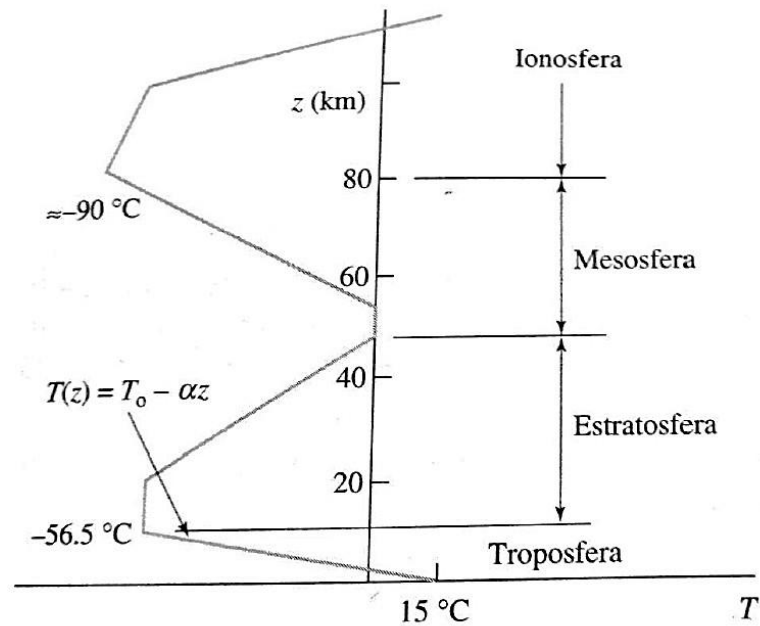


Figura 32: Variación de la presión según altitud
Fuente: Potter y Wiggert, 2015



.Figura 33: Variación de la temperatura según altitud

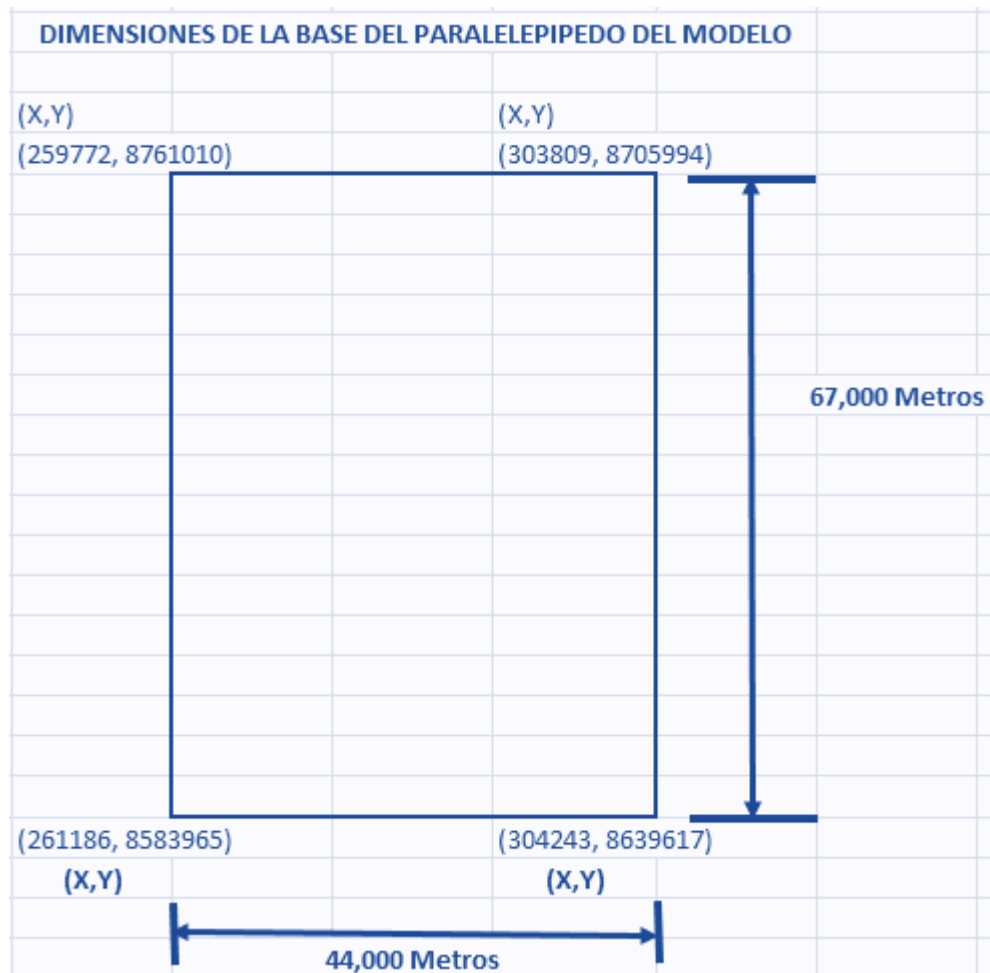
Fuente: Potter y Wiggert, 2015

En la atmósfera, al depender la densidad de la altitud y al depender la presión de la densidad, esta propiedad de la masa o materia hace que la presión dependa de la altitud, y esta expresado por $P_0 P(z)$, para el proceso de cálculo del modelo MDLE, establecemos la condición de “atmósfera estándar”, donde la temperatura varía linealmente con la altitud $T(z) = T_0 - K$, el valor de K , está relacionado a la gradiente geotérmica el mismo que en promedio es de 1.5 grados celsius en toda la troposfera que tiene un alcance de 10 mil metros de altitud, tal como se observa en la .Figura 35. Según Ramadan y Wiggert, (2015), la variación de la presión por cada 1km es del es de 2%, este es el valor de disminución de presión por cada kilómetro que consideramos en el Modelo MDLE.

5.2. Condiciones de frontera o dimensión 3D

5.2.1. Geométrica

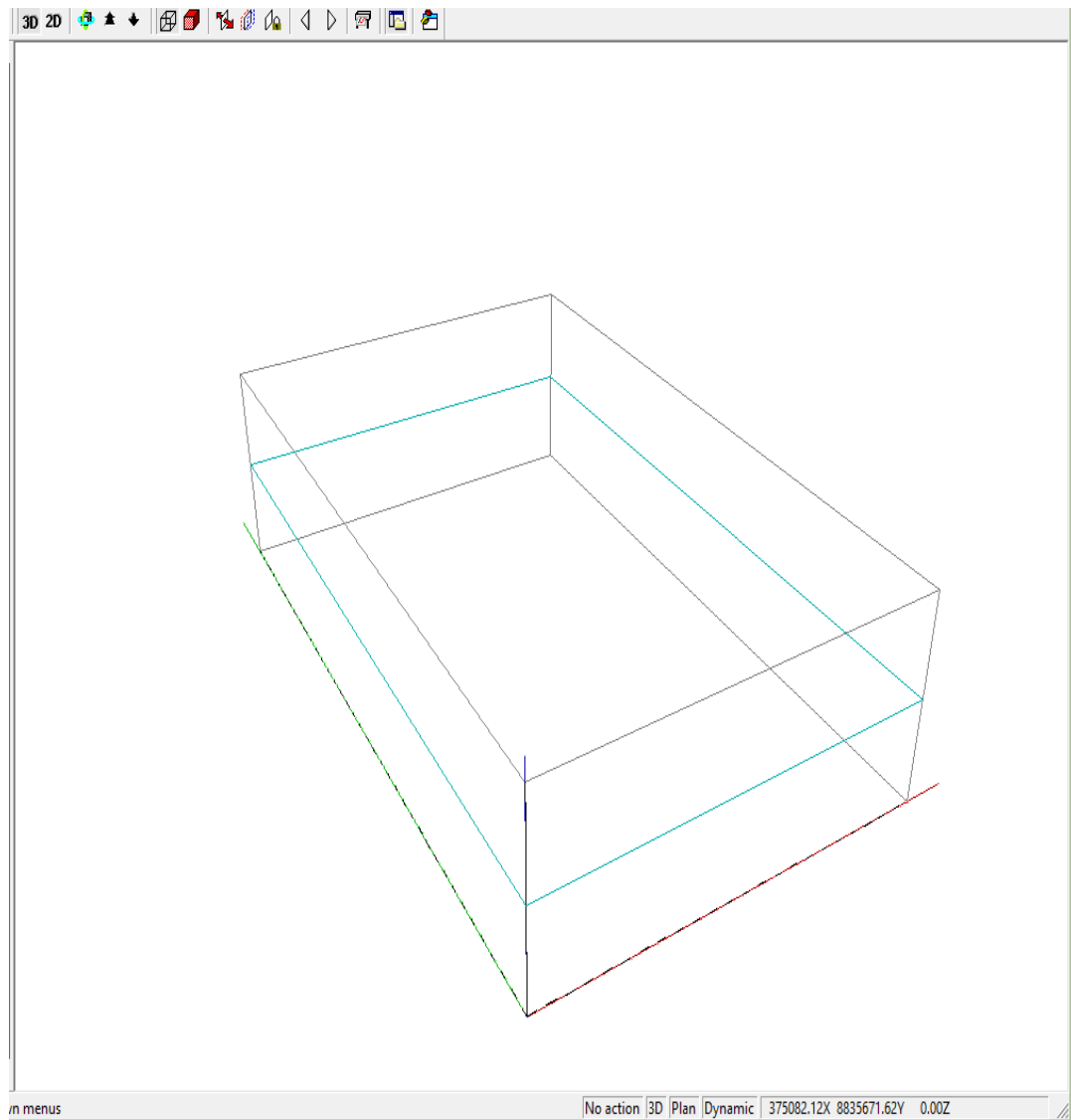
Las dimensiones geométricas del modelo MDLE, es la de un paralelepípedo horizontal con un área en la base superficial de la tierra de 44 mil metros por 67 mil metros como se ve, en la .Figura No. 34.



.Figura 34: Dimensiones del área de la base del paralelepípedo del modelo en plano X,Y

Fuente: Elaboración propia

Al aplicar una proyección vertical esta área, obtenemos el modelo en 3D desplegado en .Figura.35.



.Figura No. 35: Condiciones de frontera 3D del modelo en espacio (X,Y,Z)

Fuente: Elaboración del autor

El Grafico No. 36. Muestra la vista de las condiciones de frontera 3D del modelo con los niveles intervalos de medición en el eje Z, como se aprecia en color azul.

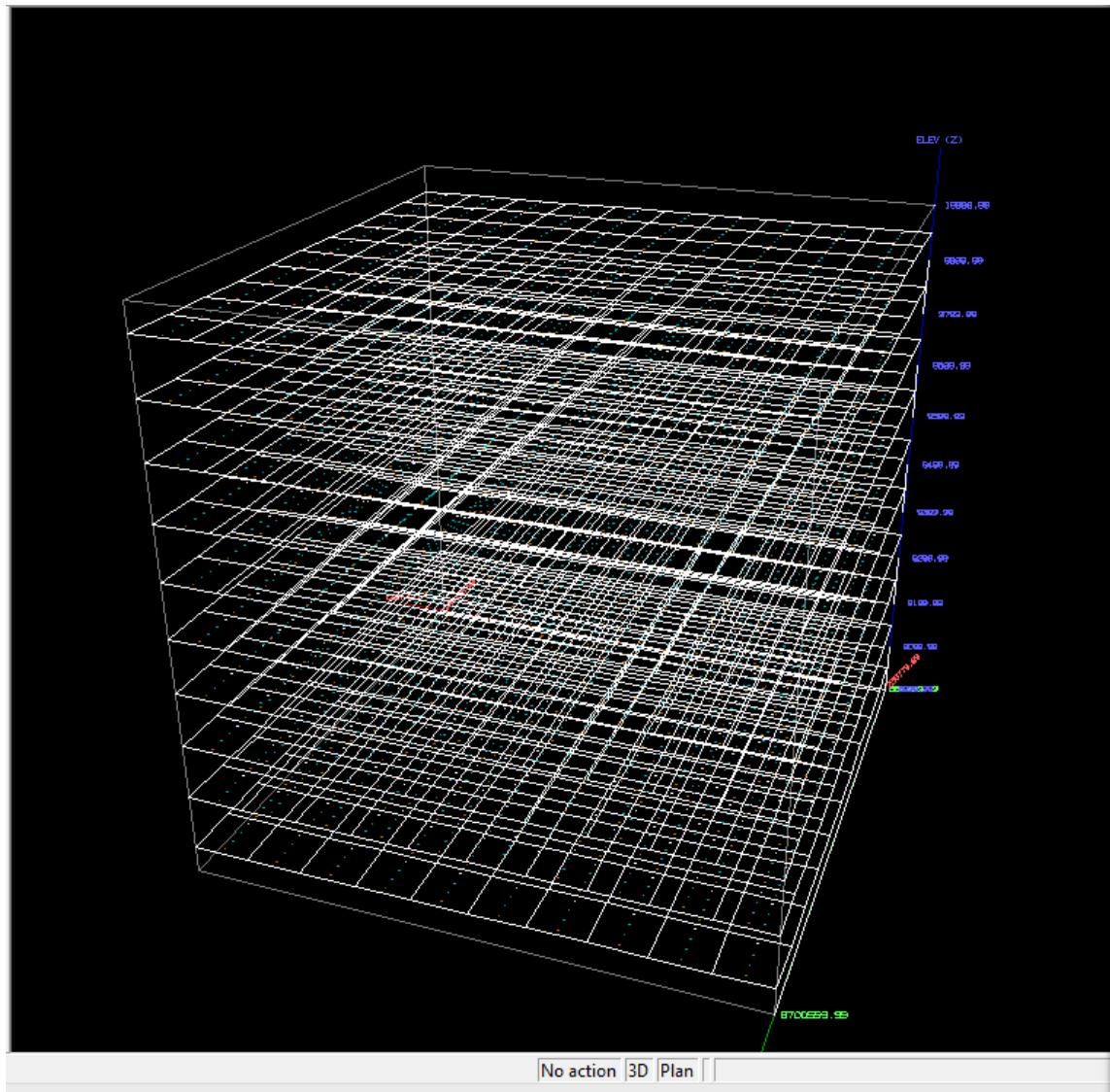
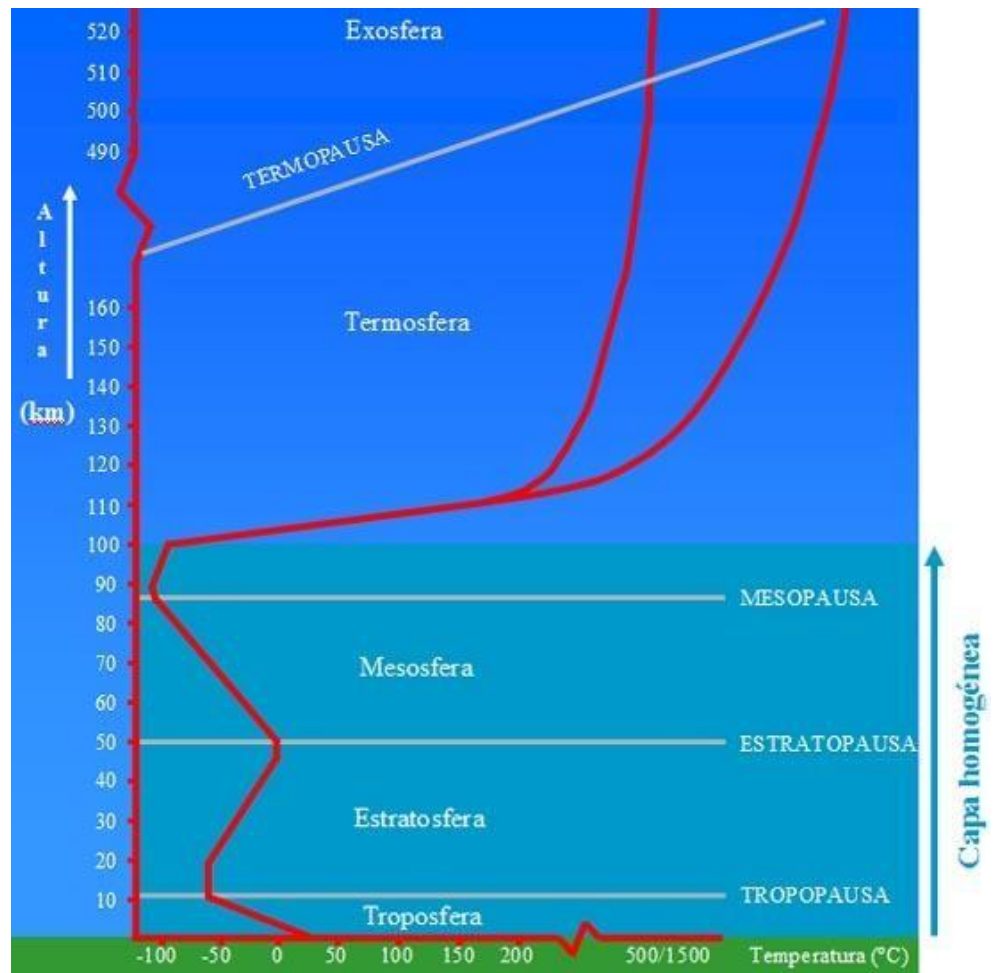


Grafico No. 36: Vista en 3D de modelo MDLE

Fuente: Elaboración del autor.

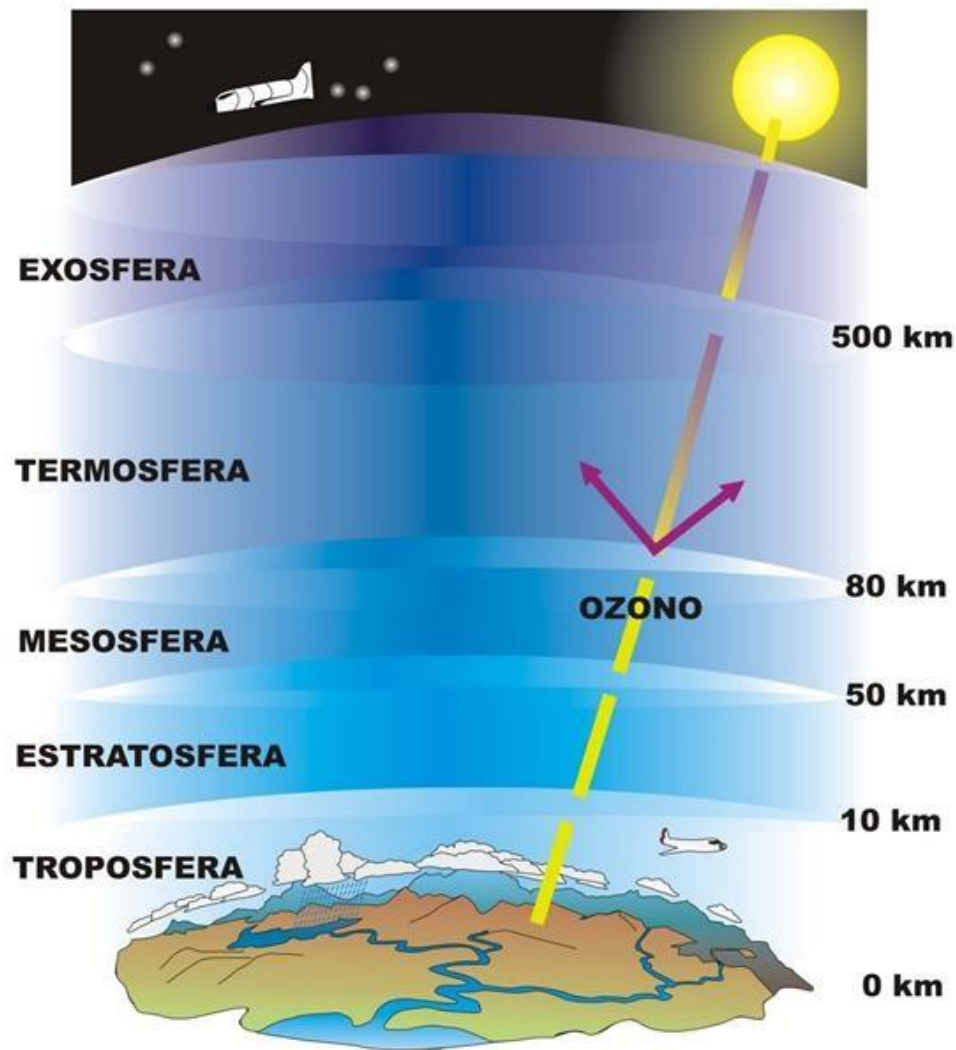
5.2.2. Zonas espaciales atmosféricas

El alcance máximo del modelo en cuanto a la altitud está definida por el límite de la troposfera el mismo que se encuentra dentro de los diez mil metros desde el nivel, porque se considera hasta esta parte de la atmosfera como atmosfera estándar donde las variaciones de la temperatura y la presión tienen una gradiente constante, por tanto dicha variación está representada por una función lineal. La .Figura 37: muestra este límite.



.Figura 37: Distribución por altitud de la atmosfera

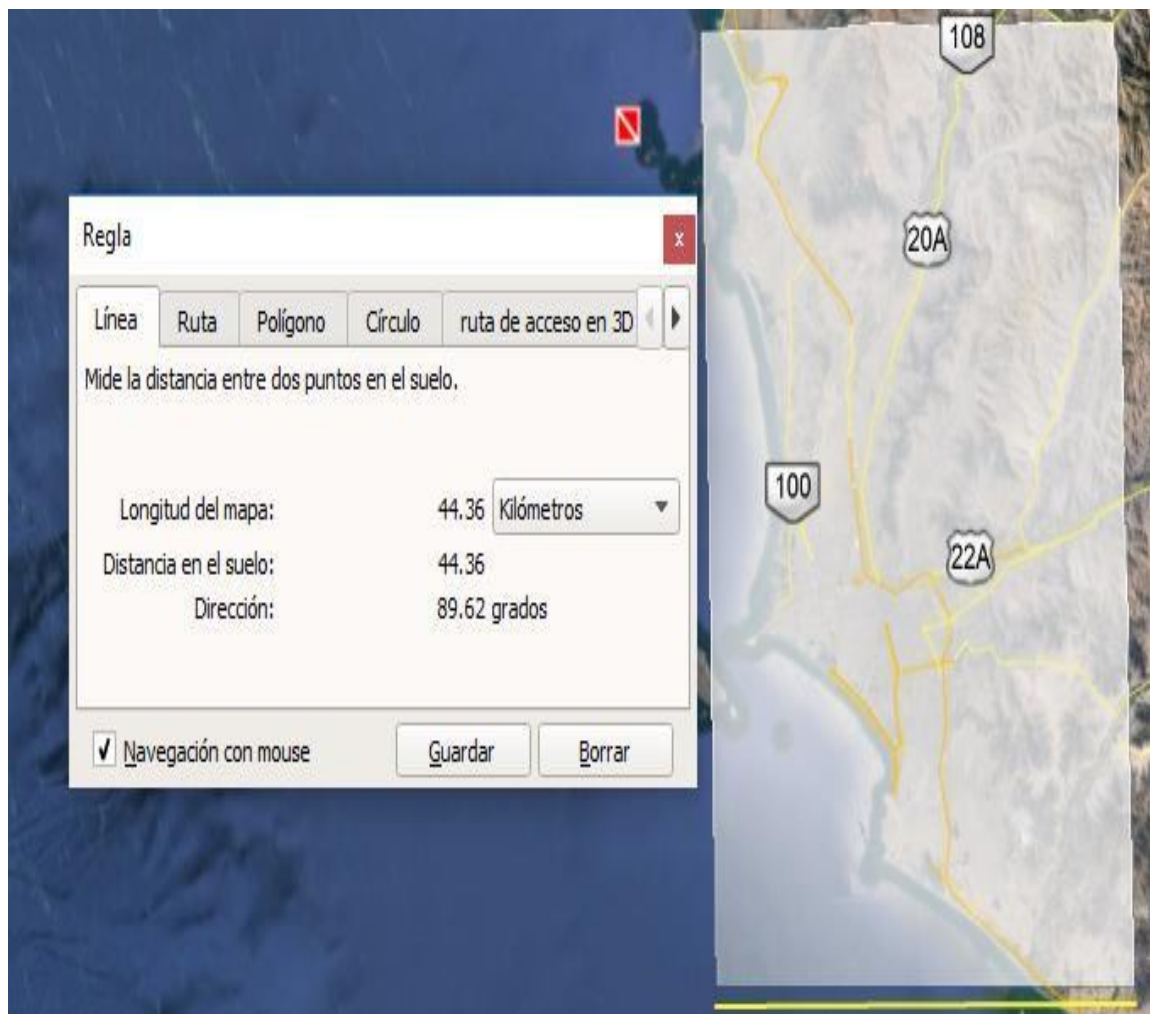
Fuente: Instituto de meteorología, Colombia (2016).



.Figura 38: Altitud de la atmosfera con acumulación de ozono
Fuente: Instituto de meteorología, Colombia (2016).

La altitud es una condición de frontera rígida, debido a que la temperatura y la presión varían en forma compleja, y dentro de los primeros diez mil metros están las zonas espaciales que el modelo considera, por la presencia de cota máxima de la superficie terrestre como Zona A, capa límite de la atmosfera como Zona B y la zona C como el espacio que se encuentra por encima de la capa limite.

La .Figura No. 39, muestra la frontera superficial en el mapa de relieve topográfico de Lima, área que es de alcance del modelo tal como mostramos en la caja de dialogo en el lado izquierdo del área. Mientras que la .Figura N. 40. Visualiza únicamente el área de la base horizontal del paralelepípedo del modelo MDLE.



.Figura 39: Vista del área superficial del modelo MDLE
Fuente: Adaptación de la superficie en relieve de Google Earth.



.Figura 40: Base rectangular del modelo MDLE
Fuente: Imagen de relieve adaptada de Google Earth.

5.3. Algoritmos del modelo

5.3.1. Algoritmo de Stirling

El algoritmo de Stirling se fundamenta en una función matemática continua donde $F(x)$ es desconocida, y un grupo de valores de x son conocidos, en el presente estudio los valores conocidos son las concentraciones de los diversos elementos presentes en la atmosfera en un conjunto de puntos a lo largo de la proyección de los puntos de medición del aire a lo largo de los diez mil metros si denotamos a estos valores como f a Δx a la diferencia entre dos valores consecutivos de x . Además consideremos un subconjunto de $m + 1$ puntos $(x_k; x_{k+1}; \dots; x_{k+m})$ y por analogía matemática $f_n \equiv f(x_n)$ para designar los valores conocidos de la función f en dicho subconjunto de valores.

Se define la diferencia finita progresiva de primer orden en el punto x_k a:

$$\Delta f_x = f_{k+1} - f_k$$

Considerando la ecuación anterior podemos generalizar en la siguiente ecuación.

$$\Delta^n f_x = \Delta^{n-1} f_{k+1} - \Delta^{n-1} f_k$$

En esta ecuación se puede observar que la diferencia finita de orden n en x_k contiene información del valor de la función en x_k y en los, n puntos situados a la derecha de x_k . Para un conjunto de $m + 1$ puntos, podemos calcular, como máximo, hasta la diferencia finita de orden m .

Para la interpolación polinómica de Stirling, el algoritmo utiliza el polinomio de Newton – Gregory (NG), progresivo, dicho polinomio de orden m , se define en el punto x_k según la expresión matemática siguiente:

$$\begin{aligned} P_m(x) = & a_0 \\ & + a_1(x - x_k) \\ & + a_2(x - x_k)(x - x_{k+1}) \\ & + a_3(x - x_k)(x - x_{k+1})(x - x_{k+2}) \\ & + \dots \\ & + a_m(x - x_k)(x - x_{k+1}) \dots (x - x_{k+m-1}) \end{aligned}$$

La ecuación anterior lo podemos generalizar como:

$$P_m(x) = \sum_{k=0}^m a_k \prod_{i=0}^{n-1} (x - x_k - i)$$

Los coeficientes de $P_m(x)$ se obtienen estableciendo la condición de interpolación, es decir,

$$P_m(x_k) = f_k \text{ con } n = k; k + 1; k + m.$$

Obteniendo los valores en las distintas iteraciones:

$$a_0 = f_k; a_1 = \Delta f_k / \Delta x; a_2 = \Delta^2 f_k / 2! (\Delta x)^2, \dots, a_n = \Delta^n f_k / n! (\Delta x)^n$$

Esto significa que, los coeficientes de $P_m(x)$ se pueden obtener directamente a partir de las diferencias finitas progresivas (de orden 1,2,.. n) en el punto x_k .

A partir del polinomio de Newton Gregory, la Interpolación de Stirling permite obtener el valor de la función en un punto x_k haciendo uso de los valores de los puntos consecutivos al lado derecho de x_k , cuya ecuación se define por.

$$F_m(x) = f_k + \nabla f_k u + \nabla^2 f_k \frac{u(u+1)}{2!} + \nabla^3 f_k \frac{u(u+1)(u+2)}{3!} + \dots$$

$$+ \nabla^m f_k \frac{u(u+1) \dots (u+m-1)}{m!} + O[(\Delta x)^{m+1}]$$

Ahora consideremos las expresiones D1NG en X_k de orden más bajo ($m = 1$), expresado por la ecuación:

$$F'_1(x_k) = \frac{1}{2\Delta x} [f_{k+1} - f_{k-1}] + O[(\Delta x)^2]$$

Si denominamos a la anterior expresión como D1ST (derivada primera en la aproximación de Stirling). La ventaja fundamental radica en que, incluyendo un solo termino, la D1ST es una aproximación de primer orden, mientras que la D1NG es de orden cero. Algo análogo ocurre con la derivada segunda. El orden más bajo ($m = 2$) para la derivada segunda en x_k utilizando las formulas NG proporciona los valores:

$$\text{D2NG prog} \quad F_2''(x_k) = \frac{\Delta^2 f_k}{(\Delta x)^2} + O[\Delta x] = \frac{1}{(\Delta x)^2} [f_{k+2} - 2f_{k+1} + f_k] + O[\Delta x]$$

A partir de la ecuación D1ST para la derivada primera en x_k , obtenemos el valor de la derivada segunda en x_k como:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{2\Delta x} [F_2'(x_{k+1}) - F_2'(x_{k-1})]$$

Reemplazando aquí, tenemos

$$F_2'(x_{k+1}) \text{ y } F_2'(x_{k-1}), \text{ tenemos}$$

$$F_2'(x_{k+1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{3}{2}f_{k+1} - 2f_k + \frac{1}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

$$F_2'(x_{k-1}) = \frac{1}{\Delta x} \left[-\frac{1}{2}f_{k+1} + 2f_k - \frac{3}{2}f_{k-1} \right] + O[(\Delta x)^2]$$

De donde llegamos a:

$$F_2''(x_k) = \frac{1}{(\Delta x)^2} [f_{k+1} - 2f_k + f_{k-1}] + O[(\Delta x)^2]$$

Esta ecuación que denominaremos D2ST es la derivada segunda en el algoritmo de aproximación de Stirling. Esta aproximación es de primer orden. Finalmente, consideramos la aproximación D1NGP de orden mas bajo para la derivada primera:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_n} = \frac{\Delta y_n}{\Delta t} + O[(\Delta t)]$$

La ecuación diferencial discretizada en el instante t_n queda en la forma:

$$\frac{\Delta y_n}{\Delta t} = f_n + O[(\Delta t)]$$

y como

$$\Delta y_n = y_{n+1} - y_n,$$

de donde deducimos la relación matemática, $y_{n+1} = y_n + f_n \Delta t$

Esta es la ecuación matemática que utilizaremos para la interpolación de las concentraciones de los elementos componentes de la atmósfera, teniendo en cuenta los valores de los tres puntos a diferentes altitudes es decir para $\Delta Z = 100$ m, aplicamos la interpolación de Stirling hasta una altitud de 10000 metros, en la ecuación:

$$d\delta_{z+1} = \delta_z \int_1^z \left(\frac{b(l-jz)}{a \exp(z/8)} * a \right) dz$$

Cuya solución numérica se representa por la ecuación de Stirling.

$$\delta_{z+1} = 2\delta_{z+1} - \delta_{z-1}$$

Donde :

δ_{z+1} , es la concentración del elemento en la cota o altitud $h = z$, n , es el número de iteraciones que se aplica a la fórmula.

$$d\delta_{z+1} = \delta_z \int_1^z (t/p) dz$$

donde :

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-\alpha z}, \text{ y } t(z) = \frac{(z-z_0)0.01484}{\log p_0 - \log p_z}$$

Además:

δ , en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Presión en Atmosferas y Temperatura en Grados kelvin

Esta expresión de la concentración, es iterada en los puntos k_i hasta k_{i-1} para cada uno de los diez puntos de medición encontrando los valores en toda la

longitud de las estaciones en intervalos de 100 metros hasta llegar a un altitud de 10 mil metros, cuya ecuación matemática final se representa por:

$$d\delta_{z+1} = \delta_z \int_1^z \left(\frac{b(l-jz)}{a \exp(z/8)} * a \right) dz$$

donde $a = 0.999$, $b = 0.01484$, $l = 15.5$ y $j = 0.00649$, y la variación de z es de 0 a 10 mil metros sobre el nivel del mar.

las unidades son:

Z, en metros y δ , en ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)

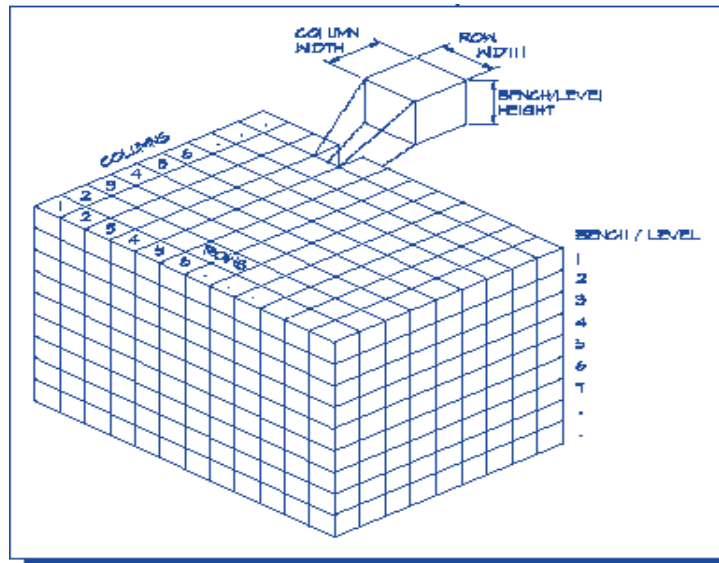
Esta misma fórmula aplicamos en las diez estaciones y por interpolación de Stirling, obtenemos los valores de la concentración del elemento en estudio en intervalos de 10 metros hasta los mil metros de altitud según nuestra condición de frontera. Los datos se procesan en hoja electrónica de cálculo en columnas verticales que en promedio se tiene cien datos por estación de monitoreo.

Las mediciones de los datos adquiridos para el cálculo inicial de contaminantes según el modelo propuesto son valores del mes de agosto del 2018.

5.3.2. Algoritmo de Kriging

La lógica de la interpolación espacial del Kriging, se fundamenta en los parámetros geométricos de la condición de frontera establecida y desde que su naturaleza es considerar las unidades básicas de medida infinitesimal en los tres ejes cartesianos, es decir dx , dy y dz , el proceso de cálculo también al integral esta diferenciales será un bloque en 3D, tal como se muestra en la .Figura No. 41. Este bloque al estar compuesto por micro bloques de dimensiones $dx.dy.dz$, finalmente en la realidad, es decir al resolver el problema o las ecuaciones diferenciales, se convierte en cubitos o bloquitos infinitesimales en cuya geometría se denota por el índice matemático (i, j, k) , el cual singularmente está identificado como una celda equivalente $(dx, dy, dz) \equiv (i,j,k)$. Para el caso de los componentes del aire en la atmosfera, los datos de

los bloquitos infinitesimales son representados por la celda tridimensional (i,j,k) , el mismo que es el contenido en esta celda.



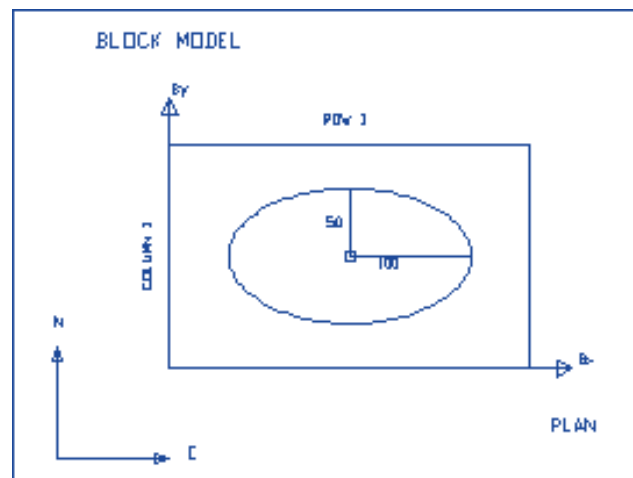
.Figura 41: Celdas (dx,dy,dz) para interpolación Kriging
Fuente: Instituto internacional Gems, 2002.

En una geometría Ortogonal con espacios uniformes o celdas equivalentes, en altitud, largo y ancho, es conocido como celdas regulares.

El método del algoritmo Kriging permiten asignar información de concentración a cada bloque infinitesimal con base geoestadístico y ecuaciones que involucran a la distribución de los semi-variograma curvas y distancias efectivas desde el valor inicial del contaminante y, define las mediciones que serán aceptadas en algoritmo Kriging basados en su relativa localización para el bloque garantizando un alto nivel de búsqueda específica por componente en el aire o elemento medido.

Los valores de cada celda (di,dj, dk) , en el modelo son asignados a partir de los datos con una rutina de interpolación Kriging, para el cual usa solo una sub serie de datos de las filas de datos de extracción y calcula el valor de cada bloque infinitesimal. Esta relación de datos es basada en la distancia da la muestra desde el centro de bloque y fija un radio de búsqueda en el cual los valores aceptables pueden ser usadas. En el modelo MDLE el ancho es de

100m., el mismo que puede variar en valores de 5- 200m. El análisis del semivariograma de la estación de datos o de la torre de medición, puede proveer mejor información con una apropiada distancia de rastreo o radio de búsqueda. Esta búsqueda con la longitud apropiada de radio es suficiente para asegurar que el máximo número de valores que serán encontrados para la mayor parte de los bloques (dx, dy,dz), con los cuales se puede calcular los valores. La .Figura No. 42, muestra en un plano estos parámetros:



.Figura 42: Radio de búsqueda en celda (dx,dy,dz) para interpolación Kriging
Fuente: Instituto internacional Gems, 2002.

Los parámetros Genéricos del algoritmo de Kriging, en realidad son un grupo de variables que se utilizan en el proceso de las iteraciones.

1. Se requiere especificar los niveles de subdivisión de bloques en X,Y, Z y es aquí, es decir en cada bloque infinitesimal tiene su varianza calculada.
2. La determinación del número mínimo de mediciones que se necesita un bloque antes de calcular en toda el bloque X, Y, Z del modelo.

En la parte superficial del modelo, donde existe un relieve topográfico, el modelo al considerar las cotas o altitudes del suelo sobre el nivel del mar, acomoda las celdas infinitesimales de tal forma que se adaptan a la topografía de la superficie, la .Figura No.43. Muestra la flexibilidad del modelo.

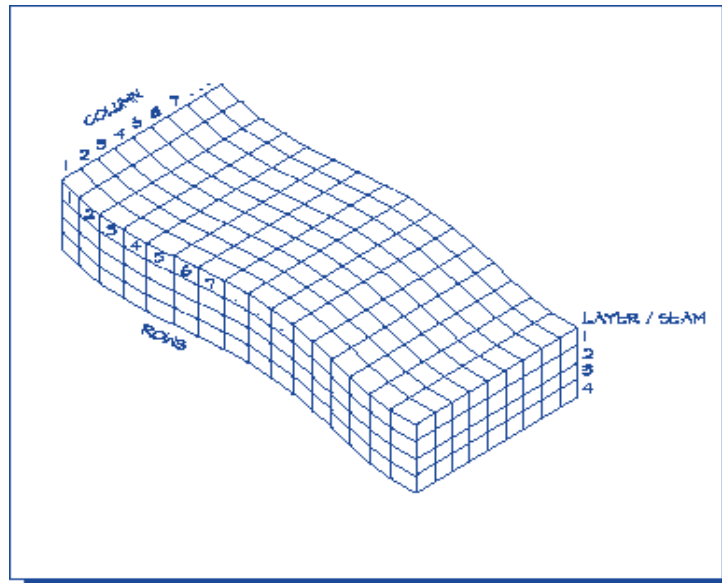
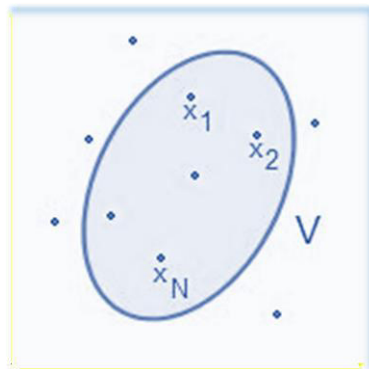


Figure 43: Adaptación de la geometría del modelo a la topografía superficial
 Fuente: Instituto Internacional Gemcom, 2002.

Las ecuaciones del kriging, se deduce del razonamiento lógico que nos permite encontrar la estimación lineal óptima no sesgada de un bloque V . interiores y exteriores a V .



.Figura 44: Estimación de Kriging.
 Fuente: Gemcom inc, Canada 2002

El kriging atribuye un peso λ_i a la muestra $z(x_i)$. Estos pesos λ_i se calculan de manera de minimizar la varianza del error cometido. Se define dentro del marco de las distancias espaciales por el kriging al estimador lineal, según la expresión

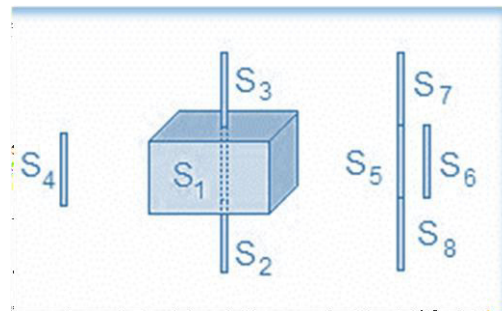
matematica:

$$Z'_K = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_N Z(x_N)$$

Esta ecuación para tener la condición de no sesgado, es suavizado con los pesos correctores λ_i :

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = 1$$

Los pesos correctores λ_i se calculan, según la expresión límite de (x,y,z) / la varianza σ_E^2 , donde el error, ε , tiende a 0. Los coeficientes λ_i , son calculados por el kriging y los atribuye a los valores altos de las concentraciones cercanas al volumen total del modelo. Sin embargo ε , que es el error, se encuentra en el rango del 2 al 5%. La .Figura No. 45 seguidamente muestra esta estimación en S_1, S_2, \dots, S_8 .



.Figura 45: Transferencia y efecto pantalla.
Fuente: Instituto Internacional Gems, Canada 2002

La estimador lineal provienen del método clásico de minimizar la expresión de σ_E^2 para el cual igualamos a cero, todas las derivadas parciales de σ_E^2 en relación $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, donde la suma de los λ_i es igual a 1. En este caso se utiliza las series de Lagrange, visto en el kriging cuya expresión es :

$$A' = \sigma_E^2 + 2\mu(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N - 1)$$

Ejecutamos $N + 1$, derivadas a esta ecuación y, obtenemos el sistema de ecuaciones que conforman el algoritmo de kriging, estas ecuaciones se muestran en la .Tabla siguiente:

.Tabla No. 12: Sistema de ecuaciones del kriging en x_i , $i: 1, N$.

$\lambda_1\gamma(x_1, x_1) + \lambda_2\gamma(x_1, x_2) + \dots$				\dots	$\lambda_N\gamma(x_1, x_N)$	+	$\mu =$	$(1/V) \cdot \int_V \gamma(x_1, x) dx.$
$\lambda_1\gamma(x_2, x_1) + \lambda_2\gamma(x_2, x_2) + \dots$				$\dots + \lambda_N\gamma(x_2, x_N)$		+	$\mu =$	$(1/V) \cdot \int_V \gamma(x_2, x) dx.$
.	
.	
.	
.	
$\lambda_1\gamma(x_N, x_1) + \lambda_2\gamma(x_N, x_2) + \dots$				\dots	$\lambda_N\gamma(x_N, x_N)$	+	$\mu =$	$(1/V) \cdot \int_V \gamma(x_N, x) dx.$
λ_1	+	λ_2	+	\dots	λ_N		=	1

Fuente: Elaborado y adaptado de la ecuación de Kriging de Matheron.

La .Tabla No.12. Muestra a $N+1$ ecuaciones, con $N+1$ incógnitas y, con coeficientes λ_i , para $i = 1, \dots, N$ en el eje de las abscisas y μ en el eje de las coordenadas $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N, \mu)$.

Para el caso del modelo MDLE, el sistema de ecuaciones que se adaptan al análisis espacial 3D, es el kriging puntual, cuyo sistema de ecuaciones lo obtenemos a partir de la .Tabla 12., los cuales se muestran en la .Tabla No. 13., las ecuaciones con las estimamos la ley media de las mediciones en el Bloque V , (paralelepípedo), un punto (x, y, z) mediante la interpolación de elipsoide con un radio de búsqueda representada por sus ejes mayor y menor. Para el volumen diferencial de V , que matemáticamente lo representamos con ΔV o infinitesimalmente como $dv = (dx, dy, dz)$.

.Tabla No. 13: Sistema de ecuaciones 3D del kriging en (x_i, y_j, z_k)

$\lambda_1 \gamma(x_1, x_1)$	$+ \lambda_2 \gamma(x_1, x_2) + ..$			$. . . + \lambda_N \gamma(x_1, x_N) + \mu =$			$\iiint \gamma(x_i, y_j, z_k) dx dy dz$
$\lambda_1 \gamma(x_2, x_1)$	$+ \lambda_2 \gamma(x_2, x_2) + ..$			$. . . + \lambda_N \gamma(x_2, x_N) + \mu =$			$\iiint \gamma(x_i, y_j, z_k) dx dy dz$
.	
.	
.	
	
$\lambda_1 \gamma(x_N, x_1)$	$+ \lambda_2 \gamma(x_N, x_2) + ..$			$. . . + \lambda_N \gamma(x_N, x_N) + \mu =$			$\gamma(x_N, x_0)$
λ_1	+	λ_2	+	+	λ_N	=	1

Fuente: Elaborado y adaptado de la ecuación de Kriging de Matheron.

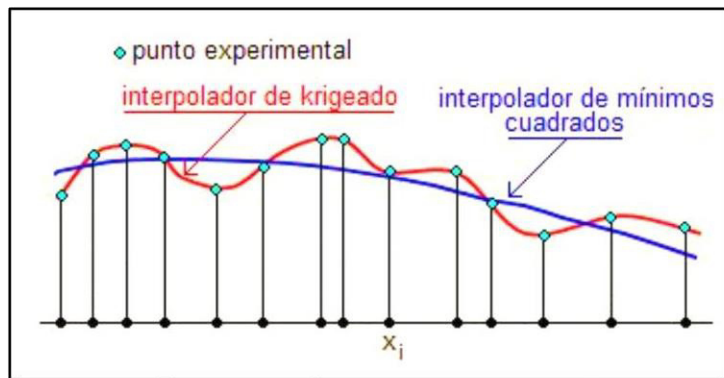
En este sistema de ecuaciones lineales, los componentes de la función Z' , tienen una variación en 3D donde un punto infinitesimal está representado por:

X_i , donde $i = 1, \dots, N$

Y_j , donde $j = 1, \dots, N$

Z_k , donde $k = 1, \dots, N$

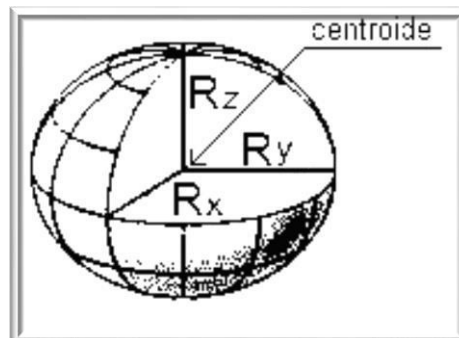
El krigeado en un punto infinitesimal es un interpolador exacto, es decir la estimación en un punto. El krigeado proporciona la concentración del elemento contaminante con una varianza $\sigma^2 = 0$. Se dice que el krigeado puntual "pasa por los puntos", tal como se muestran el Grafico No. 46.



.Figura 46: Kriging puntual unidimensional, comparado con el interpolador de mínimos cuadrados.

Fuente: Instituto internacional Gems, Canadá, 2002.

Los ejes del elipsoide de búsqueda (R_x , R_y , R_z), en la iteración, utilizan los alcances espaciales en (x , y , z), en una espacio volumétrico de búsqueda elipsoidal, el cual se muestra en la siguiente .Figura No.47.



.Figura No. 47: Elipsoide de búsqueda en una celda (dx, dy, dz).

Fuente: Instituto internacional Gems, Canadá 2002.

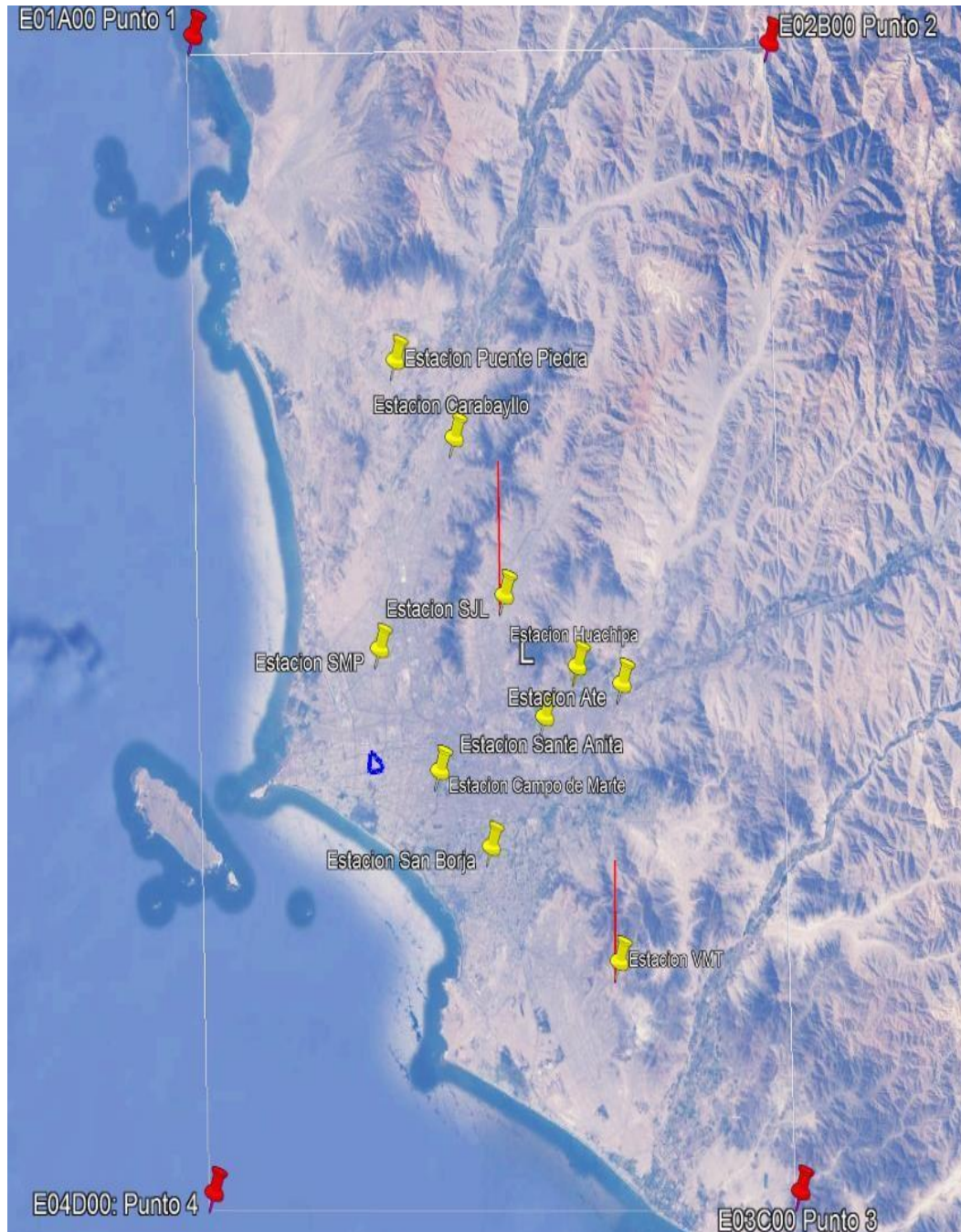
5.4. Datos de entrada (Input)

Los datos que hemos adquirido del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología –SENAMHI, órgano oficial para monitorear el aire en la ciudad de Lima, corresponden al mes de agosto del 2019, estos datos ya cuentan un control de calidad, los instrumentos de medición, también se encuentran debidamente calibrado para realizar la lectura de las concentraciones en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), de los seis elementos contaminantes, es decir, luego del proceso de recolección de la datos cuentan con certificación de calidad tanto en la técnicas como en la metodología. Asimismo, la instrumentación de los equipos calibrados también cumple con la estandarización para hacer la medición continua de cada componente contaminante atmosférico en las 10 estaciones de medición ubicada según el esquema de la .Figura No. 48 (ver plano georreferenciado en Anexo I, ítem 12), donde los valores con iniciales se realizan a 1 y 10 metros de altitud de la superficie de la tierra.

.Tabla No. 14. Coordenadas UTM de las estaciones de monitoreo en metros

ESTACION	ESTE	NORTE	ALTITUD
PUENTE PIEDRA	274053.1	8687726.5	180
CARABAYLLO	278497.6	8683450.5	190
SAN JUAN DE LURIGANCHO	282308.4	8674688.3	240
SAN MARTIN DE PORRES	273047.6	8671604.2	60
HUACHIPA	287795.5	8670775.1	140
ATE	291126.1	8669830.2	360
SANTA ANITA	285388.5	8667920.9	270
CAMPO DE MARTE	277597.3	8664836.8	120
SAN BORJA	281483.2	8660631.1	140
VILLA MARIA DEL TRIUNFO	291083.7	8654309.4	290

Fuente: Elaboración del autor



.Figura 48: Estaciones de toma de datos de SENAMHI

Fuente: adaptación referencial de Senamhi

Los datos de ingreso son de las 10 estaciones de monitoreo de calidad de aire del SENAMHI establecido en diez distritos estratégicos de Lima Metropolitana,

estos datos son .Tablas de los cinco contaminantes atmosféricos en estudio, a los cuales aplicamos la interpolación polinómica o de Stirling con la cual se obtiene de la .Tabla de datos de contaminantes mostrado en la .Figura No. 49 siguiente:

[illegible]

.Figura No 49. Datos de ingreso en formato xls

Fuente: SENAMHI, 2018

Como se observa en la .Figura 51., los datos indican diferencia de volumen, presión atmosférica, temperatura absoluta, velocidad de viento y cota sobre el nivel del mar en la parte izquierda y en la parte derecha se observan los valores de los contaminantes atmosféricos en el orden de izquierda a derecha de PM_{2.5}, PM₁₀, SO_x, NO_x, O₃ y CO.

En la parte inferior, tenemos pestañas que muestran los límites pedidos en la adquisición representado por E01A y E04D y las mediciones propiamente dicho de las estaciones que van de norte a sur, desde Puente Piedra, Carabayllo, estación SJL, hasta estación SMP. Tal como se muestra en la .Figura No.50.

ESTACION HUACHIP E22900	Dat.Estac. HUACHIP	Altura Vel.Viento	187 msnm m/s	Altura de estacion E22900					1 atm = 101325Pa			
	E22900	Temperat.	19 °C	187 msnm		Vel. Viento 1.6 - 3.3 m/s	19 °C	Cota (m.) = 187				
						Para z=h 0msnm	Pz =	101325Pa	donde Pa = Pascuales			
No. DE	Delta de	Presion en	Presion en	Temperatura	Velocidad	cota o altura	PM 2,5	PM 10	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
Mediciones	Volumen m3.	atm.	Pa.	en grados Kelvin	de viento x altura m/s	msnm	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³
1	1	0.997777	101099.77	292.00	4.23	187	35.74	186.7	0.17	80.26	0.08	2622
2	0.999709	0.997623	101084.13	291.87	5.54	200	35.73	187.05	0.17	80.24	0.08	2621.38
3	0.997471	0.996436	100963.91	290.87	7.77	300	35.68	186.97	0.17	80.13	0.08	2617.63
4	0.995225	0.995251	100843.84	289.87	6.91	400	35.59	186.48	0.17	79.92	0.08	2610.79
5	0.992972	0.994068	100723.90	288.87	6.48	500	35.45	185.57	0.17	79.61	0.08	2600.87
6	0.990714	0.992885	100604.11	287.87	6.22	600	35.28	184.24	0.17	79.22	0.08	2587.90
7	0.988447	0.991705	100484.46	286.87	6.05	700	35.06	182.50	0.17	78.73	0.08	2571.94
8	0.986175	0.990525	100364.96	285.87	5.92	800	34.80	180.36	0.17	78.15	0.08	2553.03
9	0.983895	0.989347	100245.59	284.87	5.83	900	34.50	177.84	0.17	77.48	0.08	2531.25
10	0.981609	0.98817	100126.37	283.87	5.76	1000	34.17	174.94	0.16	76.73	0.08	2506.67
11	0.979316	0.986995	100007.29	282.87	5.70	1100	33.80	171.69	0.16	75.89	0.08	2479.37
12	0.977016	0.985821	99888.35	281.87	5.65	1200	33.39	168.10	0.16	74.98	0.08	2449.46
13	0.974709	0.984649	99769.55	280.87	5.61	1300	32.95	164.20	0.16	73.98	0.07	2417.03
14	0.972395	0.983478	99650.90	279.87	5.58	1400	32.47	160.01	0.16	72.92	0.07	2382.19

▶ ...

SAN MARTIN DE PORRES

HUACHIPA

ATE

SANTA ANITA

CAMPO DE ...

+

:

◀

PROMEDIO: 2986252.333 RECuento: 3 SUMA: 8958757

.Figura No 50. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para Huachipa

Fuente: SENAMHI, (2018)

Finalmente se observa el formato que muestra los datos hasta Villa María del Triunfo, según se muestra en la .Figura No. 51.

6												
7	Dat.Estac.	Altura	292 msnm	Altura de estacion						1 atm = 101325Pa		
8	VTM	Vel.Viento	3.1 m/s	E23500	Vel. Viento	1.6 - 3.3 m/s	20 °C	Cota (m.) =	292			
9	E23500	Temperat.	20 °C	292 msnm	Para z=h 0msnm	Pz =	101325Pa	donde Pa = Pascuales				
10												
11	Delta de	Presion en	Presion en	Temperatura	Velocidad	cota o altura	PM 2,5	PM 10	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
12	Volumen m3.	atm.	Pa.	en grados Kelvin	de viento x altura m/s	msnm	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³	µg / m ³
13	1.00	1.00	100973.52	293.00	3.10	292.00	27.22	104.40	4.08	6.52	2.10	865.95
14	0.999822	0.996436	100963.91	292.92	4.18	300	27.18	104.61	4.07	6.51	2.10	864.71
15	0.997595	0.995251	100843.84	291.92	5.43	400	27.11	104.58	4.06	6.49	2.09	862.45
16	0.995361	0.994068	100723.90	290.92	5.09	500	27.01	104.32	4.05	6.47	2.08	859.18
17	0.993121	0.992885	100604.11	289.92	4.89	600	26.87	103.82	4.03	6.44	2.07	854.89
18	0.990873	0.991705	100484.46	288.92	4.75	700	26.71	103.09	4.00	6.40	2.06	849.62
19	0.98862	0.990525	100364.96	287.92	4.65	800	26.51	102.14	3.97	6.35	2.05	843.37
20	0.986359	0.989347	100245.59	286.92	4.58	900	26.28	100.96	3.94	6.30	2.03	836.18
21	0.984092	0.98817	100126.37	285.92	4.52	1000	26.03	99.57	3.90	6.24	2.01	828.06
22	0.981818	0.986995	100007.29	284.92	4.48	1100	25.75	97.97	3.86	6.17	1.99	819.04
23	0.979537	0.985821	99888.35	283.92	4.44	1200	25.44	96.17	3.81	6.09	1.96	809.16
24	0.977249	0.984649	99769.55	282.92	4.41	1300	25.10	94.18	3.76	6.01	1.94	798.45
25	0.974954	0.983478	99650.90	281.92	4.38	1400	24.74	92.02	3.71	5.93	1.91	786.94
26	0.972653	0.982308	99532.38	280.92	4.36	1500	24.35	89.70	3.65	5.83	1.88	774.67
27	0.970344	0.98114	99414.01	279.92	4.34	1600	23.94	87.22	3.59	5.74	1.85	761.69

ATE SANTA ANITA CAMPO DE MARTE SAN BORJA VMT

.Figura No 51. Datos de ingreso SENAMHI en formato xls para VMT

Fuente: Adaptado de SENAMHI, 2019

A partir de estos 12 libros que se presentan en la parte inferior del formato xls, los mismos que van desde (E01A , ..., VTM), mostrados anteriormente, mediante procesos simples de manejo de base de datos, simplificamos la totalidad de estos datos solamente a cuatro archivos principales que el modelo MDLE tiene estructurado para el ingreso masivo de datos, estos 4 archivos tienen en su estructura las mediciones de la totalidad de las estaciones cuyo inicio de dicho archivo mostrado en la .Figura N. 52., muestra los 30 primeras mediciones que ingresa al modelo.

1	STAT-ID	FROM	TO	SAMPLE_No	PM25	PM10	SOx	NOx	O_3	COx
2	E01A00	0.00	4000.00	E01A00-1	35.93	16.28	7.74	17.43	9.47	974.56
3	E01A00	4000.00	4500.00	E01A00-2	40.38	22.13	8.70	19.59	10.65	1095.37
4	E01A00	4500.00	5000.00	E01A00-3	43.28	26.00	9.33	20.99	11.41	1173.92
5	E01A00	5000.00	5500.00	E01A00-4	46.11	30.06	9.94	22.37	12.16	1250.65
6	E01A00	5500.00	6000.00	E01A00-5	48.83	34.22	10.52	23.69	12.88	1324.48
7	E01A00	6000.00	6500.00	E01A00-6	51.41	38.39	11.08	24.94	13.56	1394.35
8	E01A00	6500.00	7000.00	E01A00-7	53.80	42.44	11.59	26.10	14.19	1459.19
9	E01A00	7000.00	7500.00	E01A00-8	55.97	46.26	12.06	27.15	14.76	1518.00
10	E01A00	7500.00	8000.00	E01A00-9	57.88	49.74	12.47	28.07	15.26	1569.81
11	E01A00	8000.00	8100.00	E01A00-10	59.50	52.77	12.82	28.86	15.69	1613.75
12	E01A00	8100.00	8200.00	E01A00-11	60.80	55.27	13.10	29.49	16.03	1649.08
13	E01A00	8200.00	8300.00	E01A00-12	62.06	57.74	13.37	30.10	16.36	1683.18
14	E01A00	8300.00	8400.00	E01A00-13	63.26	60.17	13.63	30.69	16.68	1715.94
15	E01A00	8400.00	8500.00	E01A00-14	64.42	62.54	13.88	31.25	16.99	1747.27
16	E01A00	8500.00	8600.00	E01A00-15	65.52	64.85	14.12	31.78	17.27	1777.04
17	E01A00	8600.00	8700.00	E01A00-16	66.55	67.07	14.34	32.28	17.55	1805.18
18	E01A00	8700.00	8800.00	E01A00-17	67.53	69.19	14.55	32.76	17.80	1831.58
19	E01A00	8800.00	8900.00	E01A00-18	68.43	71.21	14.75	33.20	18.04	1856.15
20	E01A00	8900.00	9000.00	E01A00-19	69.27	73.10	14.93	33.60	18.26	1878.82
21	E01A00	9000.00	9100.00	E01A00-20	70.03	74.86	15.09	33.97	18.46	1899.50
22	E01A00	9100.00	9200.00	E01A00-21	70.72	76.48	15.24	34.30	18.65	1918.13
23	E01A00	9200.00	9300.00	E01A00-22	71.33	77.95	15.37	34.60	18.81	1934.63
24	E01A00	9300.00	9400.00	E01A00-23	71.86	79.25	15.48	34.86	18.94	1948.96
25	E01A00	9400.00	9500.00	E01A00-24	72.30	80.38	15.58	35.07	19.06	1961.06
26	E01A00	9500.00	9600.00	E01A00-25	72.66	81.34	15.66	35.25	19.16	1970.88
27	E01A00	9600.00	9700.00	E01A00-26	72.94	82.11	15.72	35.38	19.23	1978.40
28	E01A00	9700.00	9800.00	E01A00-27	73.13	82.70	15.76	35.47	19.28	1983.59
29	E01A00	9800.00	9820.00	E01A00-28	73.24	83.09	15.78	35.53	19.31	1986.43
30	E01A00	9820.00	9840.00	E01A00-29	73.25	83.30	15.79	35.53	19.31	1986.90
31	E01A00	9840.00	9860.00	E01A00-30	73.25	83.46	15.79	35.53	19.31	1986.90

.Figura No.52. Datos de ingreso del inicio del archivo Station_ASSAY .

Fuente: Elaboración del autor

En el gráfico .Figura No 52, del archivo denominado “Station_ASSAY”, se muestra el final del archivo indicando los datos finales del mismo archivo que están en el rango de 7,221 a 7,248 que es el último valor de las mediciones que ingresa al modelo para este archivo.

7221	STAM-ID	FROM	TO	SAMPLE_NO	PM25	PM10	SO2	NO2	O3	CO
7222	E23520	8100.00	8200.00	E23520-11	24.04	94.01	4.64	2.70	0.39	536.22
7223	E23520	8200.00	8300.00	E23520-12	24.53	97.99	4.74	2.76	0.39	547.30
7224	E23520	8300.00	8400.00	E23520-13	25.01	101.88	4.83	2.81	0.40	557.96
7225	E23520	8400.00	8500.00	E23520-14	25.47	105.68	4.92	2.87	0.41	568.14
7226	E23520	8500.00	8600.00	E23520-15	25.90	109.36	5.00	2.91	0.42	577.82
7227	E23520	8600.00	8700.00	E23520-16	26.31	112.89	5.08	2.96	0.42	586.97
7228	E23520	8700.00	8800.00	E23520-17	26.70	116.27	5.15	3.00	0.43	595.56
7229	E23520	8800.00	8900.00	E23520-18	27.05	119.46	5.22	3.04	0.43	603.55
7230	E23520	8900.00	9000.00	E23520-19	27.38	122.46	5.29	3.08	0.44	610.92
7231	E23520	9000.00	9100.00	E23520-20	27.68	125.24	5.34	3.11	0.44	617.64
7232	E23520	9100.00	9200.00	E23520-21	27.96	127.78	5.40	3.15	0.45	623.70
7233	E23520	9200.00	9300.00	E23520-22	28.20	130.08	5.44	3.17	0.45	629.07
7234	E23520	9300.00	9400.00	E23520-23	28.41	132.12	5.48	3.20	0.46	633.73
7235	E23520	9400.00	9500.00	E23520-24	28.58	133.88	5.52	3.22	0.46	637.66
7236	E23520	9500.00	9600.00	E23520-25	28.72	135.36	5.54	3.23	0.46	640.85
7237	E23520	9600.00	9700.00	E23520-26	28.83	136.55	5.56	3.24	0.46	643.30
7238	E23520	9700.00	9800.00	E23520-27	28.91	137.44	5.58	3.25	0.46	644.99
7239	E23520	9800.00	9820.00	E23520-28	28.95	138.02	5.59	3.26	0.46	645.91
7240	E23520	9820.00	9840.00	E23520-29	28.96	138.31	5.59	3.26	0.46	646.06
7241	E23520	9840.00	9860.00	E23520-30	28.96	138.53	5.59	3.26	0.46	646.06
7242	E23520	9860.00	9880.00	E23520-31	28.95	138.69	5.59	3.26	0.46	645.91
7243	E23520	9880.00	9900.00	E23520-32	28.94	138.79	5.58	3.26	0.46	645.60
7244	E23520	9900.00	9920.00	E23520-33	28.92	138.82	5.58	3.25	0.46	645.14
7245	E23520	9920.00	9940.00	E23520-34	28.89	138.80	5.58	3.25	0.46	644.53
7246	E23520	9940.00	9960.00	E23520-35	28.85	138.72	5.57	3.25	0.46	643.76
7247	E23520	9960.00	9980.00	E23520-36	28.81	138.57	5.56	3.24	0.46	642.84
7248	E23520	9980.00	9990.00	E23520-37	28.77	138.37	5.55	3.24	0.46	641.77
7249	E23520	9990.00	10000.00	E23520-38	28.71	138.10	5.54	3.23	0.46	640.55
7250										
7251										

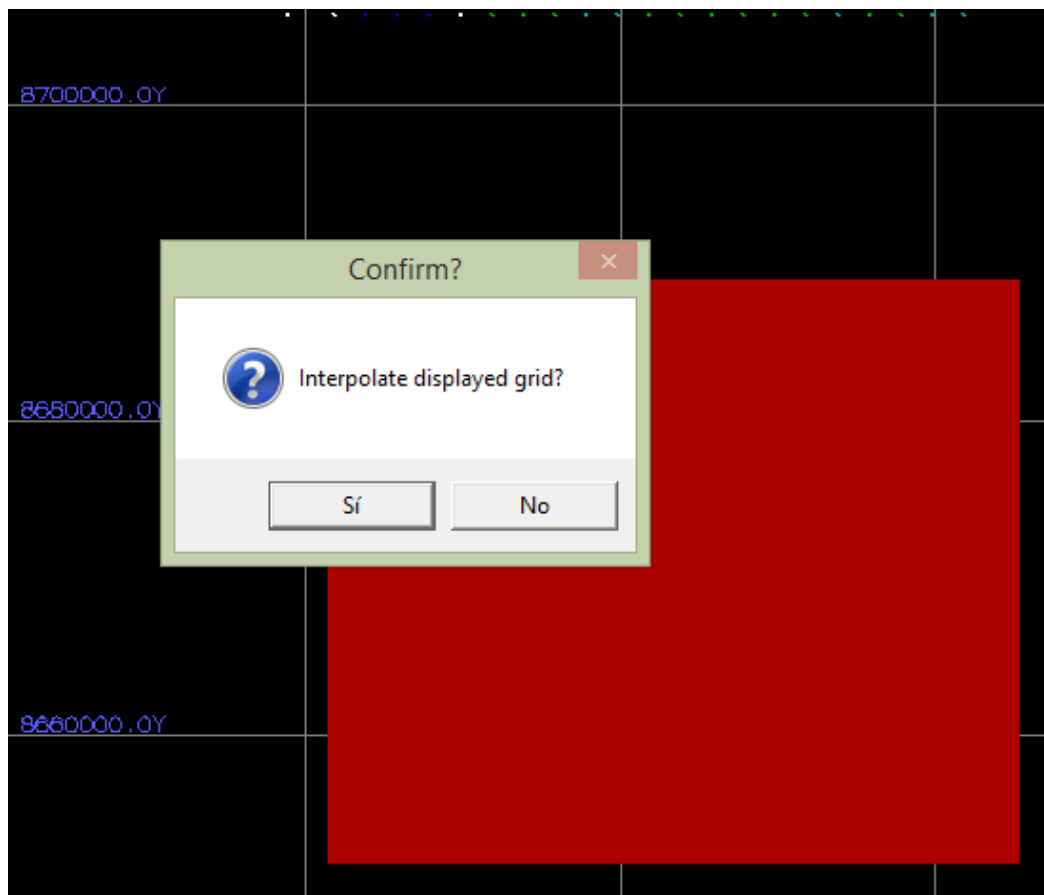
.Figura No 53. Datos de ingreso del final del archivo “Station_ASSAY” .

Fuente: Elaboración del autor

5.5. Proceso de calculo

5.5.1. Interpolación en 2D

La ejecución de los algoritmos se realiza en dos etapas, inicialmente se ejecuta en el plano de vista de planta, mediante 100 iteraciones en el área que le asignemos en forma manual, tal como se muestra en la siguiente .Figura No. 56, donde el área de color rojo es la que se le asigna en forma gráfica y las coordenadas UTM de color azul, indican la posición georreferenciadas de la superficie terrestre, por supuesto el área de color rojo, donde se procesa la información se encuentra dentro de las condiciones de frontera del modelo MDLE.

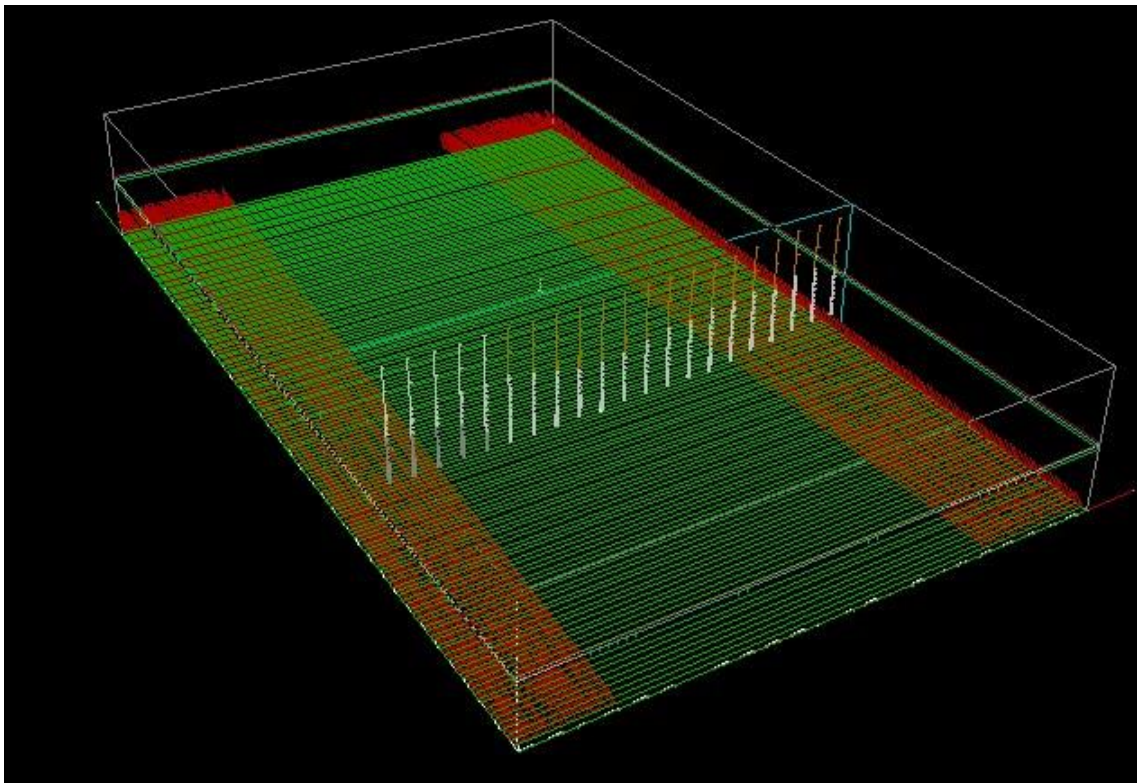


.Figura No 56. Interpolación 2D del MDLE en el área asignada.

Fuente: Elaboración del autor.

5.5.2. Interpolación en 3D

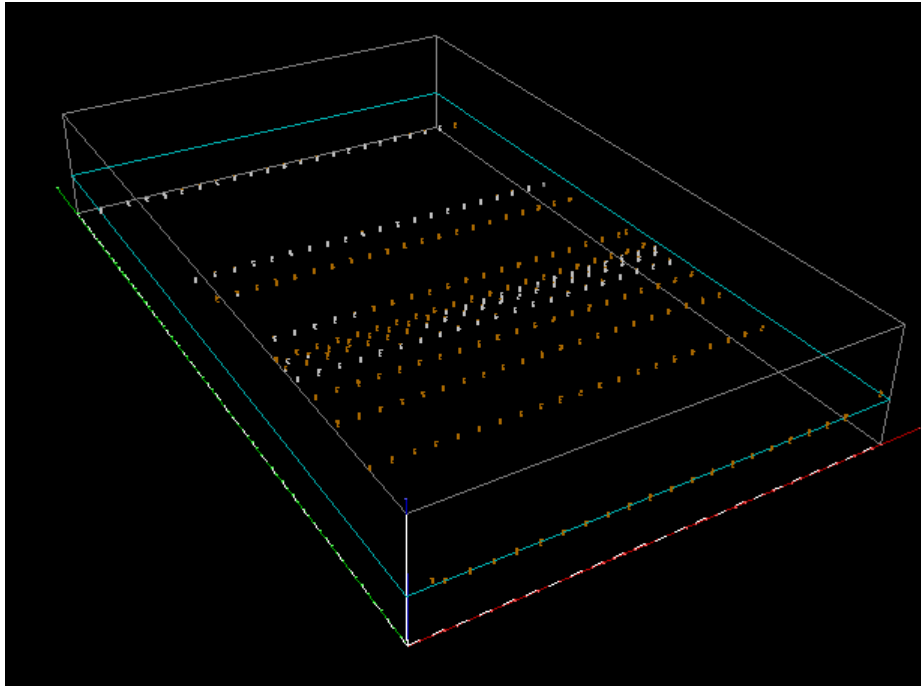
Para la ejecución de los algoritmos en el espacio tridimensional, donde se da solución al sistema de ecuaciones lineales de kriging, se activa las condiciones geométricas del modelo, tal como se muestra en la .Figura No. 57. Donde el área de color rojo es la que se le asigna en forma gráfica y las coordenadas UTM de color azul, indican la posición georreferenciadas de la superficie terrestre, por supuesto el área de color rojo, donde se procesa la información se encuentra dentro de las condiciones de frontera del modelo MDLE.



.Figura No 57. Interpolación 3D en todo el ámbito del MDLE.

Fuente: Elaboración del autor.

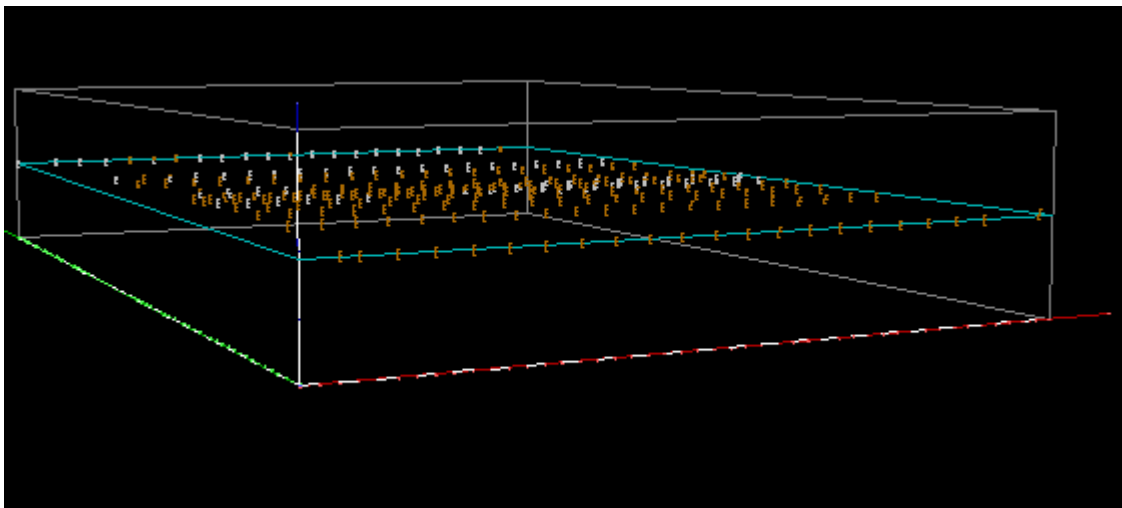
En la siguiente .Figura No. 58, vemos la asignación grafica del espacio que deseamos ejecutar la interpolación, donde, gráficamente seleccionamos con el cuadro interactivo toda la geometría del modelo preferentemente iniciando desde el centro del objeto.



.Figura No.58. Selección en 3D de todo el ámbito del MDLE.

Fuente: Elaboración del autor.

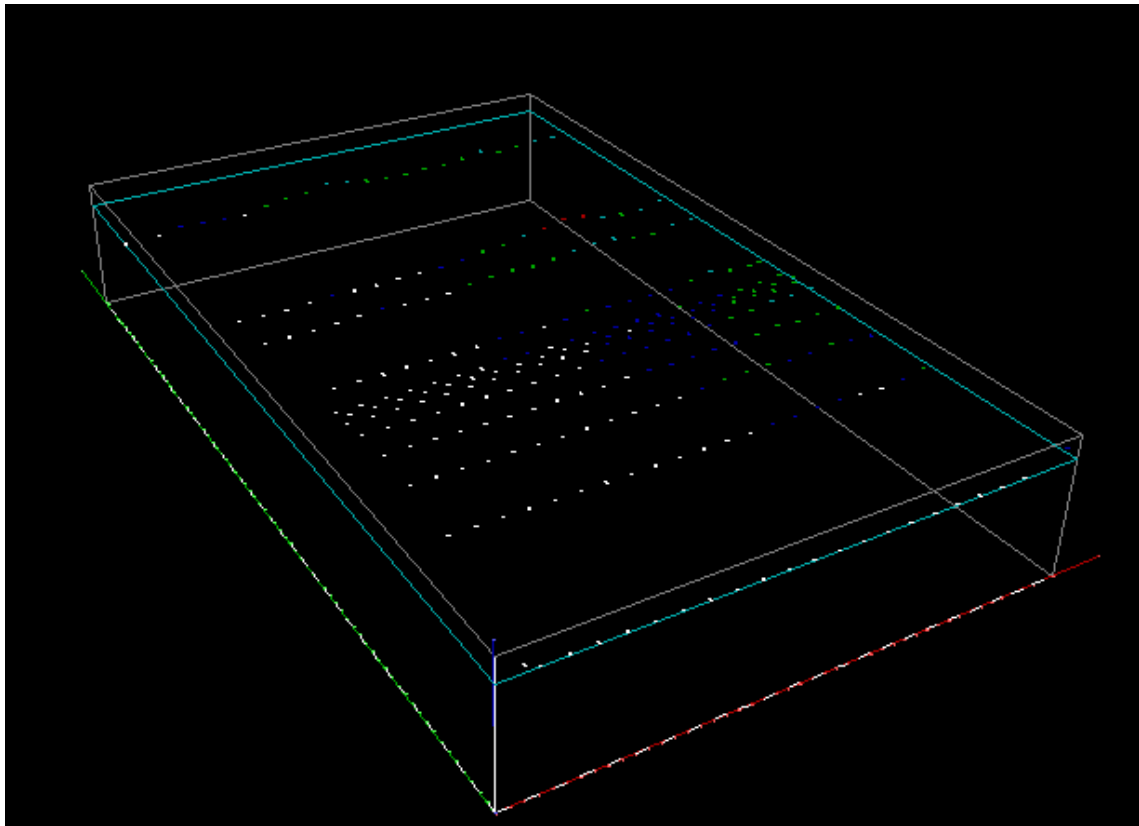
La línea que se encuentra en el medio del objeto geométrico es el área de selección, el mismo que se desplaza en las vistas de planta según el rango de iteración que elegimos, la .Figura No. 59, es otra vista desde un Angulo más cercano, esto es posible aplicando zoom del soporte lógico que estamos utilizando en este caso el Gemcom.



.Figura No 59. Zoom en 3D del área de selección.

Fuente: Elaboración del autor.

Finalmente en la .Figura No. 60 observamos la totalidad de los puntos a interpolar en todo el ámbito geométrico del modelo, nótese que, el área de selección se ha desplazado a la parte superficial de la geometría del modelo, es decir al límite de la condición de frontera vertical.

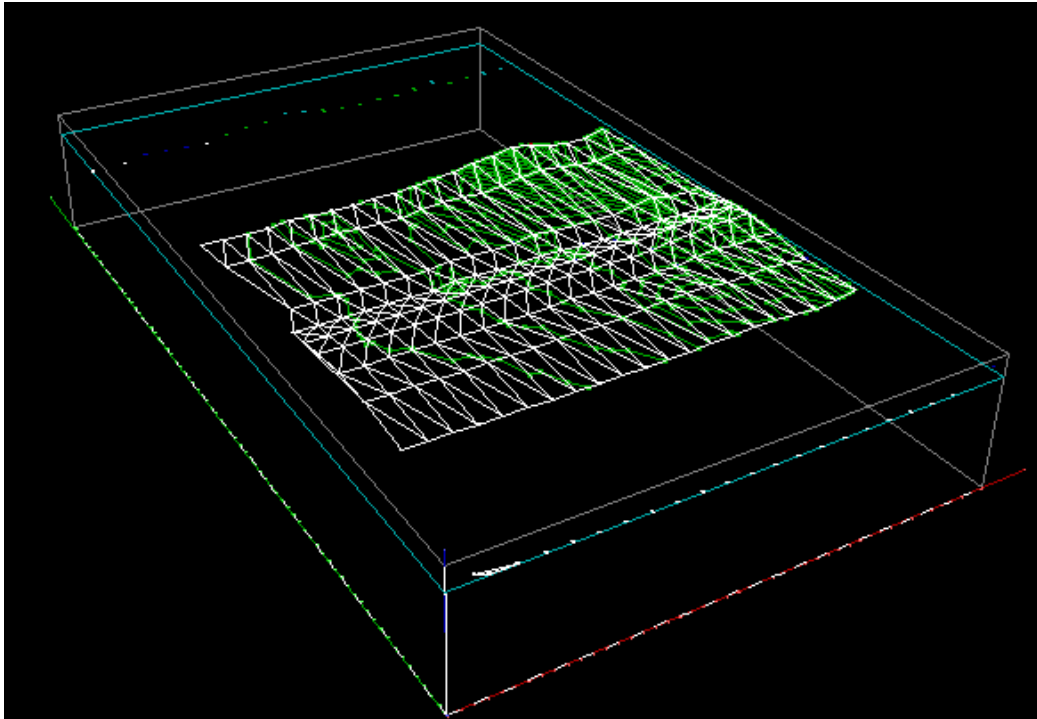


.Figura No 60. Desplazamiento del área de selección al extremo superior del modelo.
Fuente: Elaboración del autor.

5.6. Datos de salida (Output)

5.6.1. Isovalores de partículas

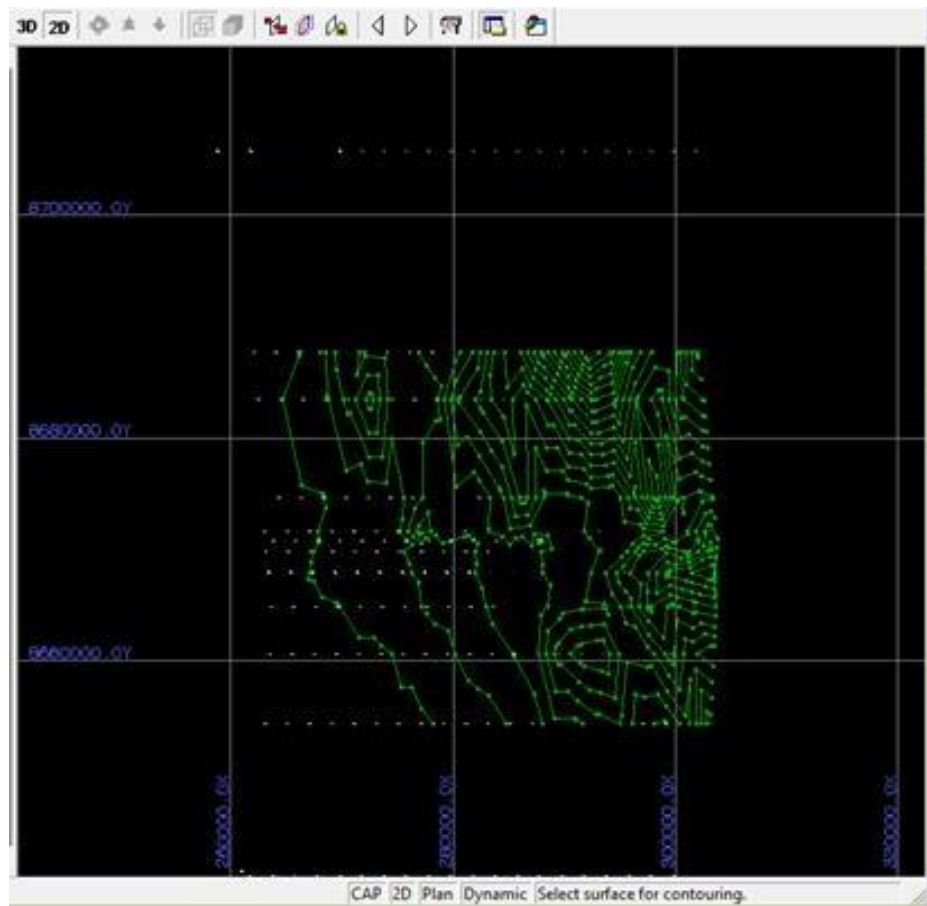
Luego del proceso de cálculo el modelo MDLE, presenta los valores de las partículas en suspensión para los diferentes altitudes sobre el nivel del mar, desde los valores que van en la superficie topográfica, hasta una altitud del límite de h , que está representada por la variable Z_k , para $k = 1, \dots, 10000$ metros, estos mapas podemos ver en 3D y en 2D, desde la zona 1, donde Z_k varia de 0 a 1914 msnm. La .Figura No. 61, muestra el mapa de isovalores (en color verde) de las partículas PM_{10} en 3D.



.Figura No 61. Vista en 3D de isovalores de PM_{10} .

Fuente: Elaboración del autor.

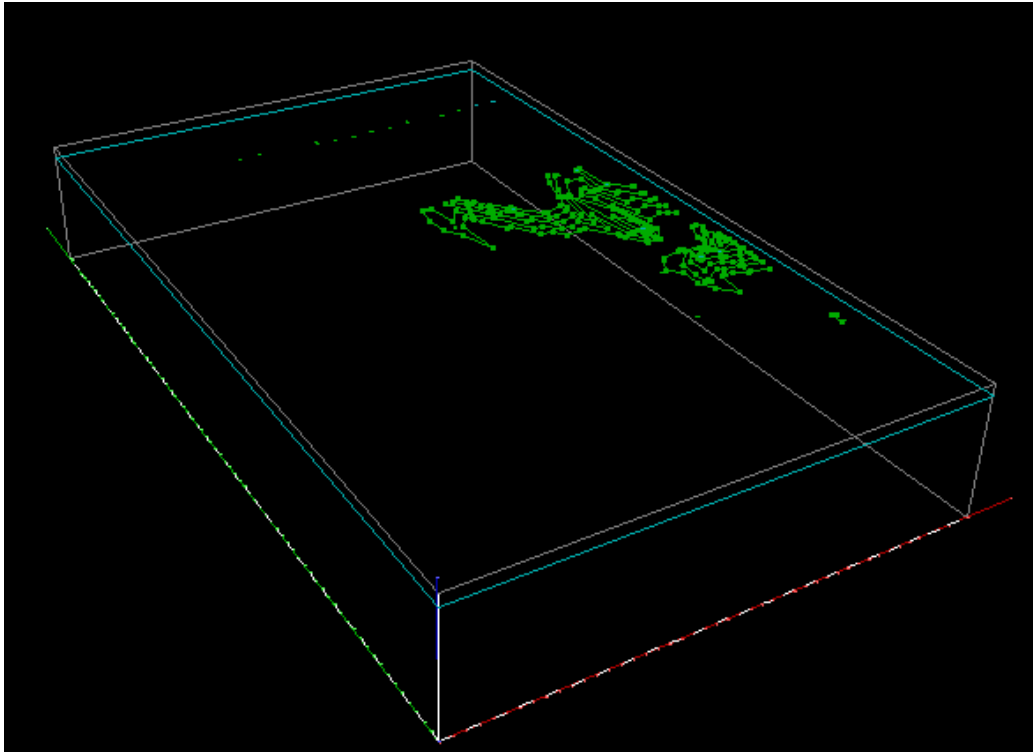
Por el amplio alcance geográfico no se pueden apreciar las isovalores, por lo que mostramos a continuación en 2D, tal como se muestra en la .Figura No. 62



.Figura No 62. Vista en 2D de isovalores de PM₁₀.

Fuente: Elaboración del autor.

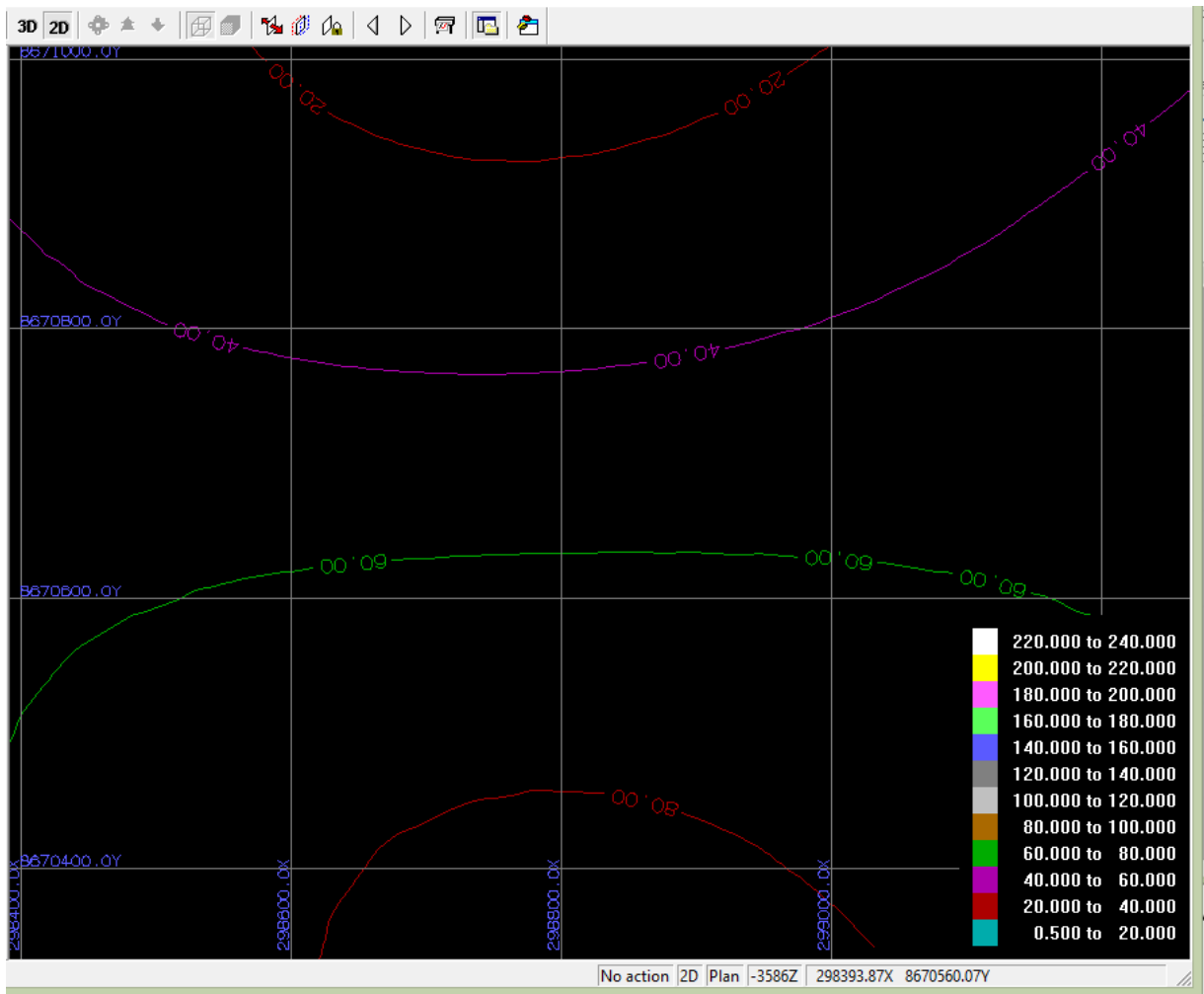
En la .Figura No. 63, visualizamos las isovalores a otra altitud diferente, siempre en el rango de 10 a 10000, ya que la condición de frontera topográfica, está limitada hasta esta cota.



.Figura No.63. Vista en 3D de isovalores de PM₁₀ en otra cota.

Fuente: Elaboración del autor.

La .Figura No. 64 muestra las isovalores de PM₁₀ después de aplicar el zoom en el área de la vista en planta.

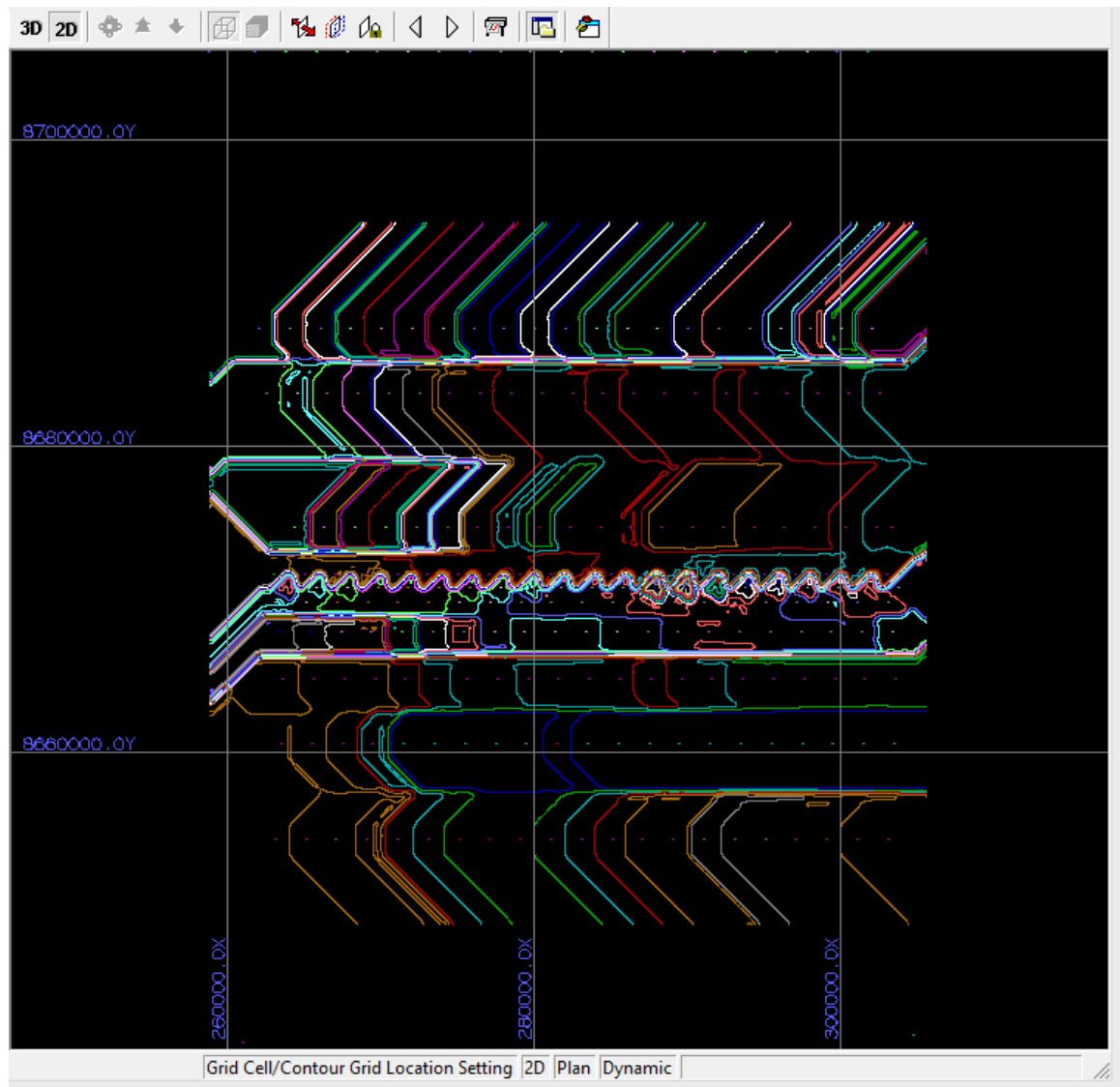


.Figura No 64. Curvas de isovalores de PM₁₀.

Fuente: Elaboración del autor.

5.6.2. Isovalores de gases

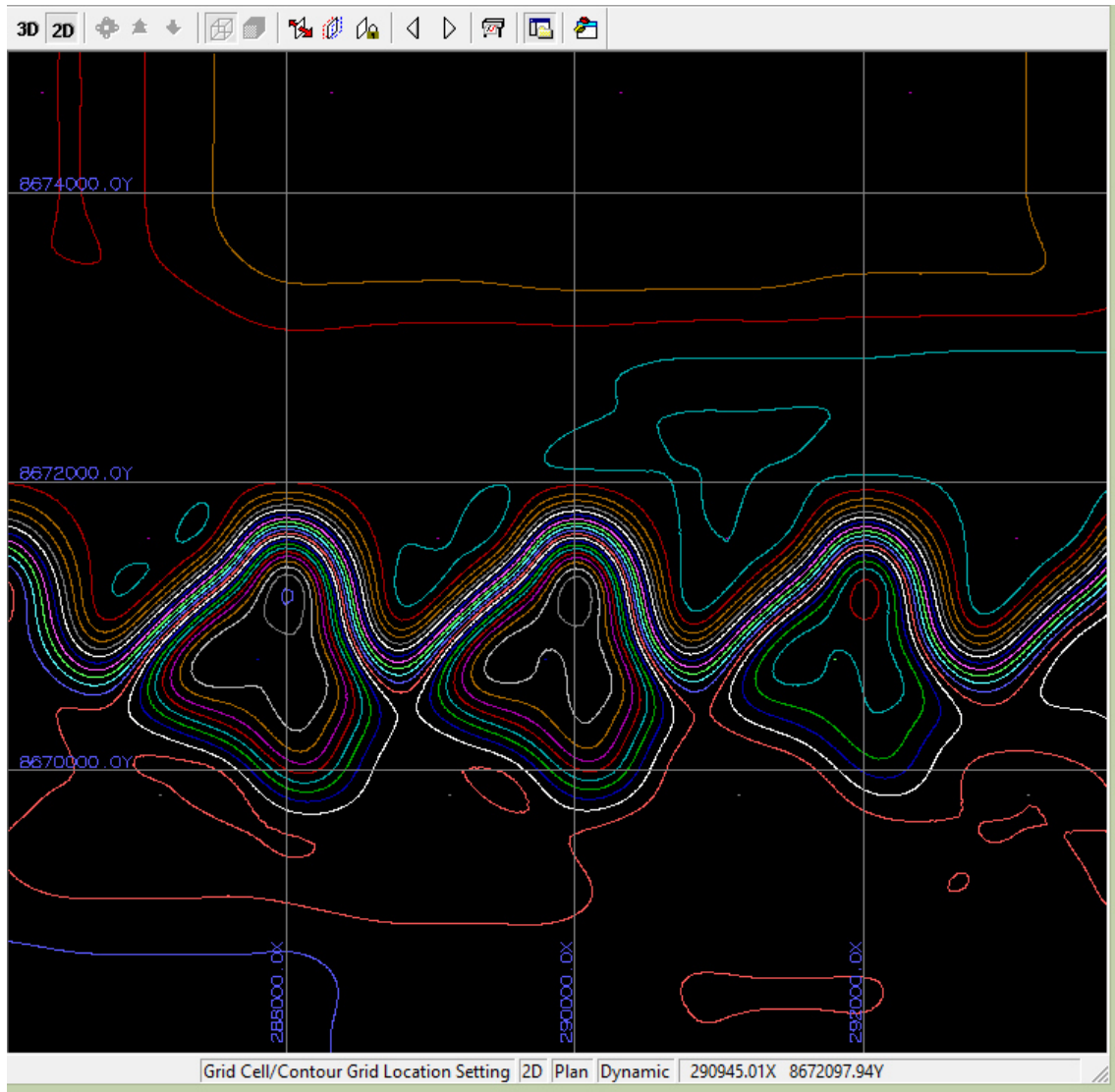
Las curvas para los isovalores de los elemento gaseosos contaminantes del aire se muestran en la .Figura No. 65. Mostramos para el CO, desde la totalidad hasta las más ampliadas con zoom.



.Figura 65. Curvas de isovalores de CO.

Fuente: Información del modelo MDLE

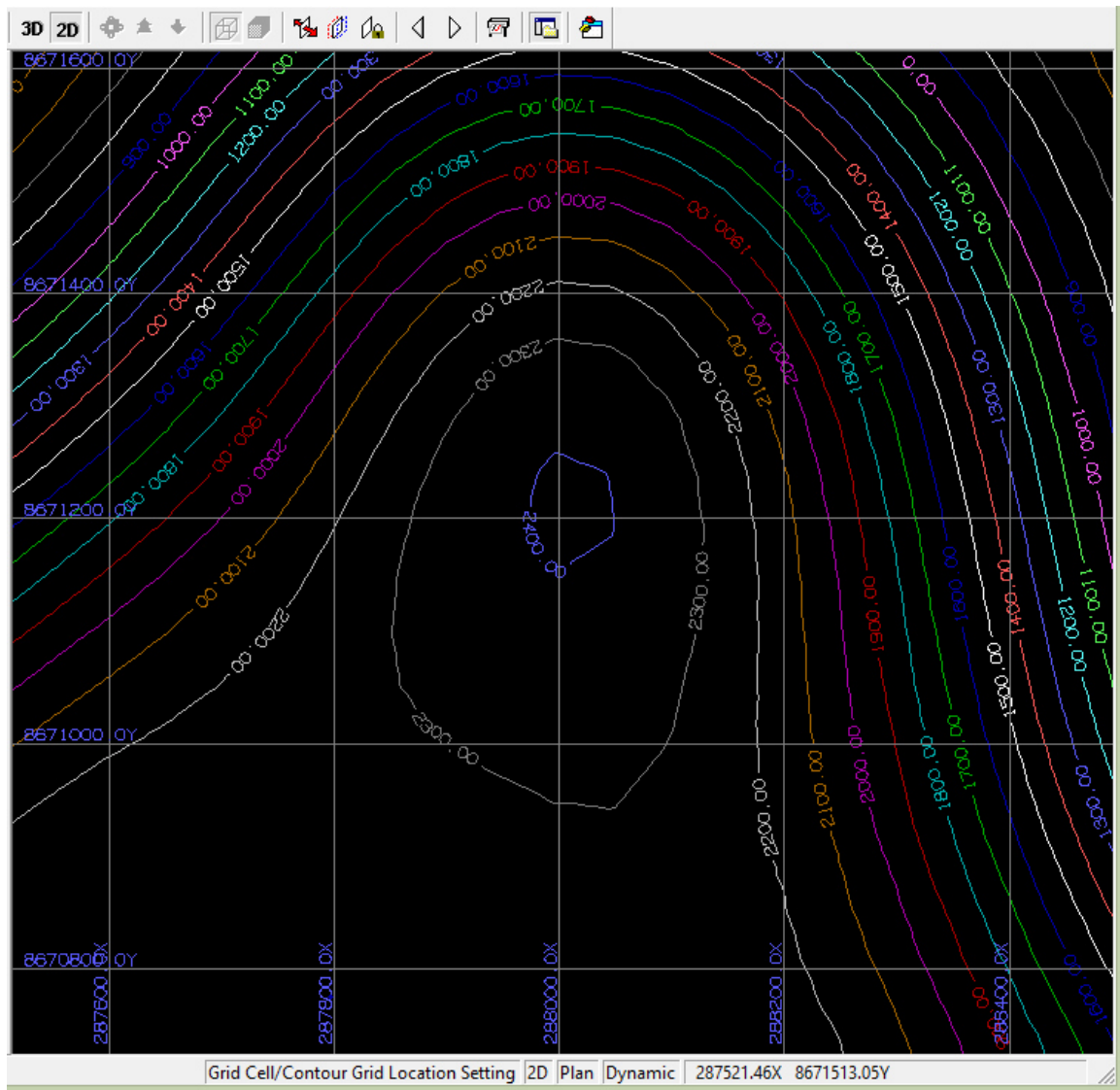
Otra vista más cercana nos muestra la .Figura No. 66, mostramos el acercamiento de una parte del mapa de isovalores mediante el ZOOM de soporte informático del modelo y visualizamos este interfaz.



.Figura No 66. Curvas de isovalores de CO ampliada con zoom

Fuente: Información del modelo MDLE

Finalmente, podemos apreciar en la .Figura No. 67, los valores que el modelo ha obtenido mediante la interpolación de Stirling y Kriging, respectivamente.



.Figura No 67. Curvas de isovalores de CO a detalle

Fuente: Información del modelo MDLE

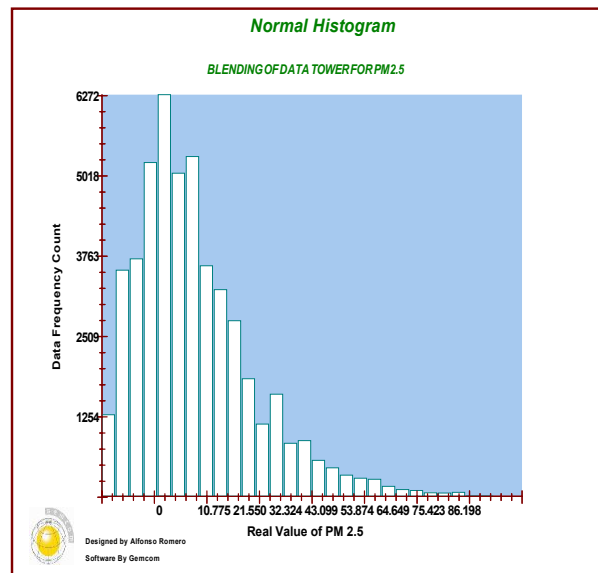
CAPITULO VI: RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Análisis e Interpretación de resultados

6.1.1. Estadística de resultados

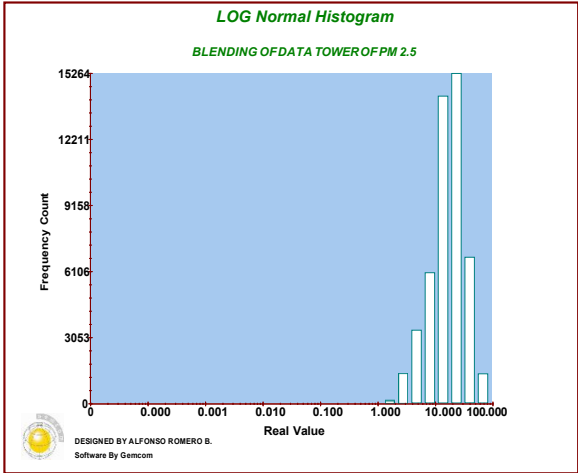
a.- Análisis lineal

La información estadística de los datos que ingresaron para la ejecución de los dos algoritmos, se presentan en los cuadros siguientes, donde mostramos, los histogramas de distribución normal y log-normal del análisis lineal y asimismo los reportes del análisis multivariable. Solamente presentamos en esta parte del presente documento los análisis de algunos elementos contaminantes, la presentación del análisis para el resto de los elementos se encuentran en el anexo. Los siguientes gráficos, muestran para la partícula en suspensión $PM_{2.5}$.

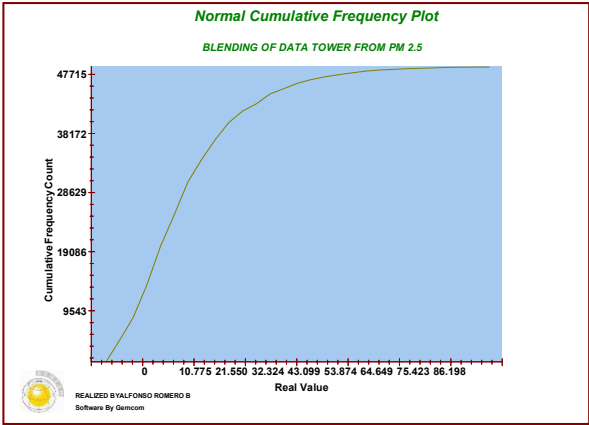


.Figura No 68. Histograma de distribución normal para $PM_{2.5}$.

Fuente: Información del modelo MDLE

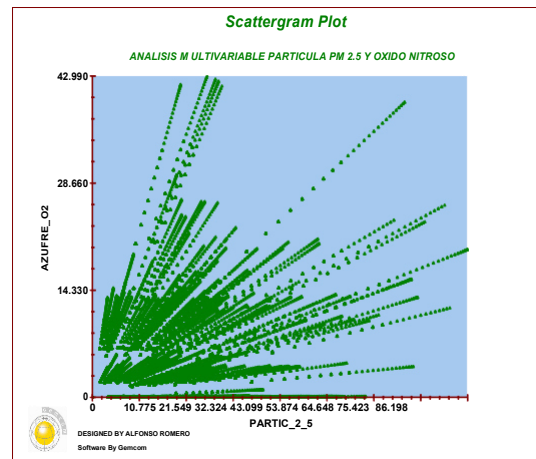


.Figura No 69. Histograma de log-normal para PM_{2.5}.
Fuente: Información del modelo MDLE



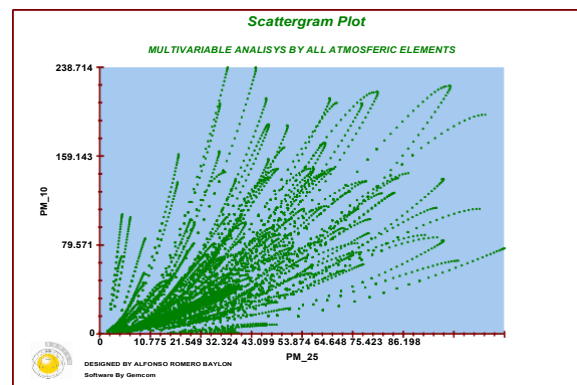
.Figura No 70. Frecuencia acumulada para PM _{2.5}.
Fuente: Información del modelo MDLE

b.- Análisis multilíneal



.Figura No 71. Interrelación multivariada para PM_{2.5} y SO₂.

Fuente: Información del modelo MDLE



.Figura No 72. Interrelación multivariada para PM_{2.5} y PM₁₀.

Fuente: Información del modelo MDLE

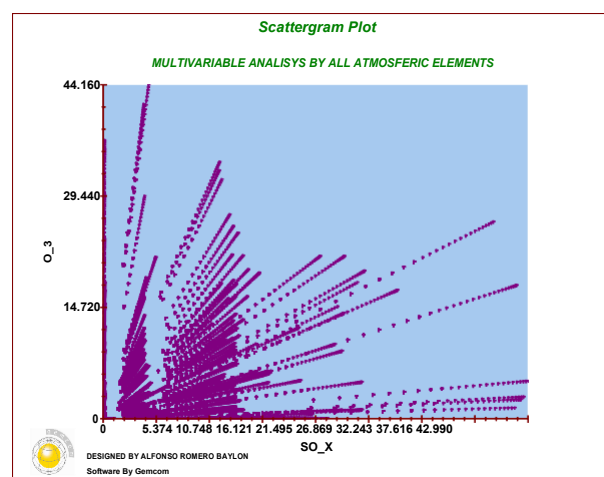
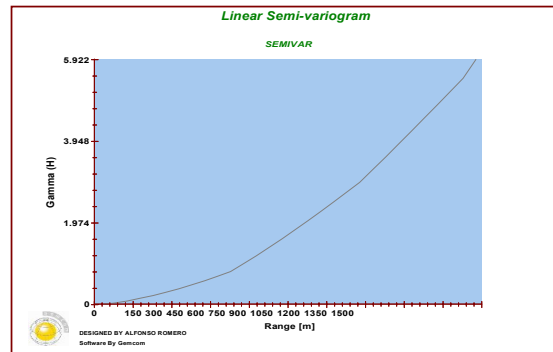


Grafico No 73. Interrelación multivariada para O₃ y SO₂.

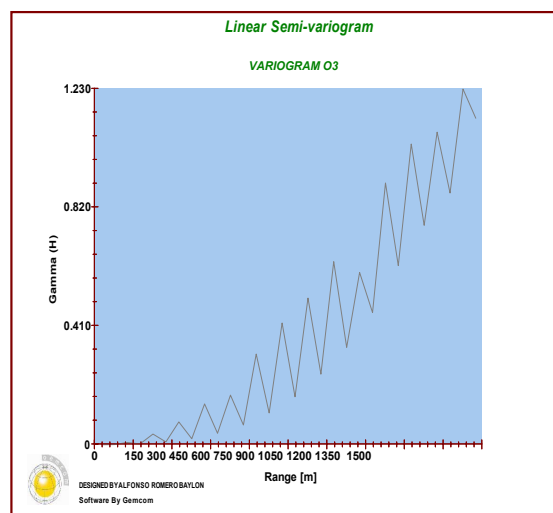
Fuente: Información del modelo MDLE

6.1.2. Geo estadística de resultados

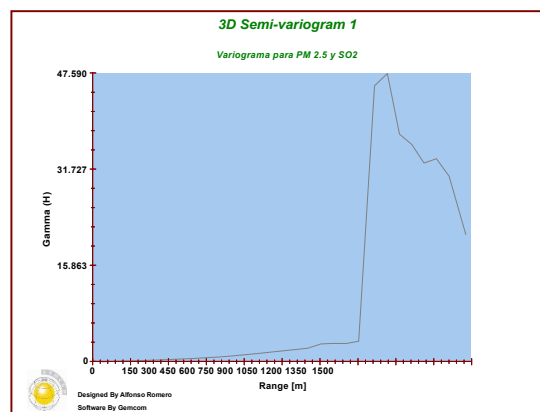
Los diversos resultados del análisis geoestadístico del modelo, presentamos en las siguientes .Figuras.



.Figura No 74. Semi variogramapara PM_{2.5}
Fuente: Información del modelo MDLE



.Figura No 75. Semi variograma para O₃.
Fuente: Información del modelo MDLE



.Figura No 76. Semi variograma espacial para PM_{2.5} y SO₂.
Fuente: Información del modelo MDLE

6.1.3. Interpretación de resultados para PM₁₀

a.- Instrumentos de interpretación

La evolución de los estándares o índices de calidad del aire – ICA, oficializada por el Minam en el 2008, fue adaptado de los estándares de calidad de la EPA, tal como se muestran los valores en la .Tabla No. 15.

Desde el año 2000 estos valores se venían utilizando en la calificación del estado del aire y los rangos establecidos en el ICA, estaban muy elevados.

.Tabla No. 15: Colores y rango de valores establecidos por ICA - Minam

Índice de Calidad del Aire - ICA	PM ₁₀ (µg /m ³)	SO (µg /m ³)	NO ₂ (µg /m ³)	O ₃ (µg /m ³)
	24 Horas	24 Horas	01 Horas	08 Horas
0 - 50	0 - 50	0 - 20	>0 - 40	>0 - 60
>50 - 100	>50 - 150	>20 - 80	>40 - 200	>60 - 120
>100 - 200	>150 - 250	>80 - 500	➤ 200	➤ 120
>200 - 300	>250 - 420	>500 - 2500		
➤ 300	➤ 420	➤ 2500		

Fuente: Adaptado del Minam (2008).

Asimismo, tenemos también el estado de la calidad del aire y el rango del índice establecido. La siguiente .Tabla, muestra estos índices y el estado del aire para ICA.

.Tabla No. 16: Estado, rango y color de calidad de aire

Estado de Calidad del Aire	Rangos del ICA
Bueno	0 - 50
Moderado	>50 - 100
Malo	>100 - 200
Muy malo	>200 - 300
Alerta máxima	>300 - 500

Fuente: Adaptado del Minam (2008).

El indicador INCA.

Para obtener este Índice Nacional de Calidad de Aire – INCA, oficializada para por el Minam en el 2015, los valores que a continuación mostramos, son las que se consideran a partir de dicho año. El INCA, es cuasi similar al ICA pero con algunas diferencias, tal como mostramos en la .Tabla No. 17.

.Tabla No. 17: Índice INCA para partículas en suspensión

Rangos INCA PM ₁₀	PM ₁₀ (µg /m ³)	Rangos INCA PM _{2.5}	PM _{2.5} (µg /m ³)
	24 Horas		01 Horas
0 - 50	0 - 75	0 - 50	0 - 12.5
>51 - 100	>76 - 150	>51 - 100	>12.6 - 25
>101 - 167	>151 - 250	>101 - 500	>25.1 - 125
➤ 300	➤ 250	➤ 500	➤ 125

Fuente: Adaptado del Minam (2008).

.Tabla No. 18: Índice INCA para SO_x y NO_x

Rangos INCA SO ₂	SO ₂ (µg /m ³)	Rangos INCA NO ₂	NO ₂ (µg /m ³)
	24 Horas		01 Horas
0 - 50	0 - 10	0 - 50	0 - 100
>51 - 100	>11 - 20	>51 - 100	>101 - 200
>101 - 625	>21 - 500	>100 - 150	>201 - 300
➤ 625	➤ 500	➤ 150	➤ 300

Fuente: Adaptado del Minam (2015).

A diferencia de ICA, el INCA considera como estado de la calidad del aire, como una categoría de calidad del aire, considerando solo cuatro categorías llamado también nivel de calidad del aire asignando, con los colores que indicamos en la .Tabla No. 19., a cada categoría.

.Tabla No. 19: Categorías del estado del aire según color y rango INCA

Categoría del Nivel de Calidad del Aire	Índice de Calidad del Aire – INCA (Valores adimensionales)			
	PARA PM _{2.5}	PARA PM ₁₀	PARA SO ₂	PARA NO ₂
Buena	0 - 50	0 - 50	0 - 50	0 - 50
Moderada	>51 - 100	>51 - 100	>51 - 100	>51 - 100
Mala	>101 - 500	>101 - 167	>101 - 625	>100 - 150
Umbral de cuidado	➤ 500	➤ 300	➤ 625	➤ 150

Fuente: Adaptado del Minam 2015.

Las concentraciones de cada elemento contaminante que define por su concentración en el aire mostramos en la .Tabla No. 20. Estos rangos son independientes del rango de INCA.

.Tabla No. 20: Rango del valor de concentración en $\mu\text{g} / \text{m}^3$, por cada elemento contaminante

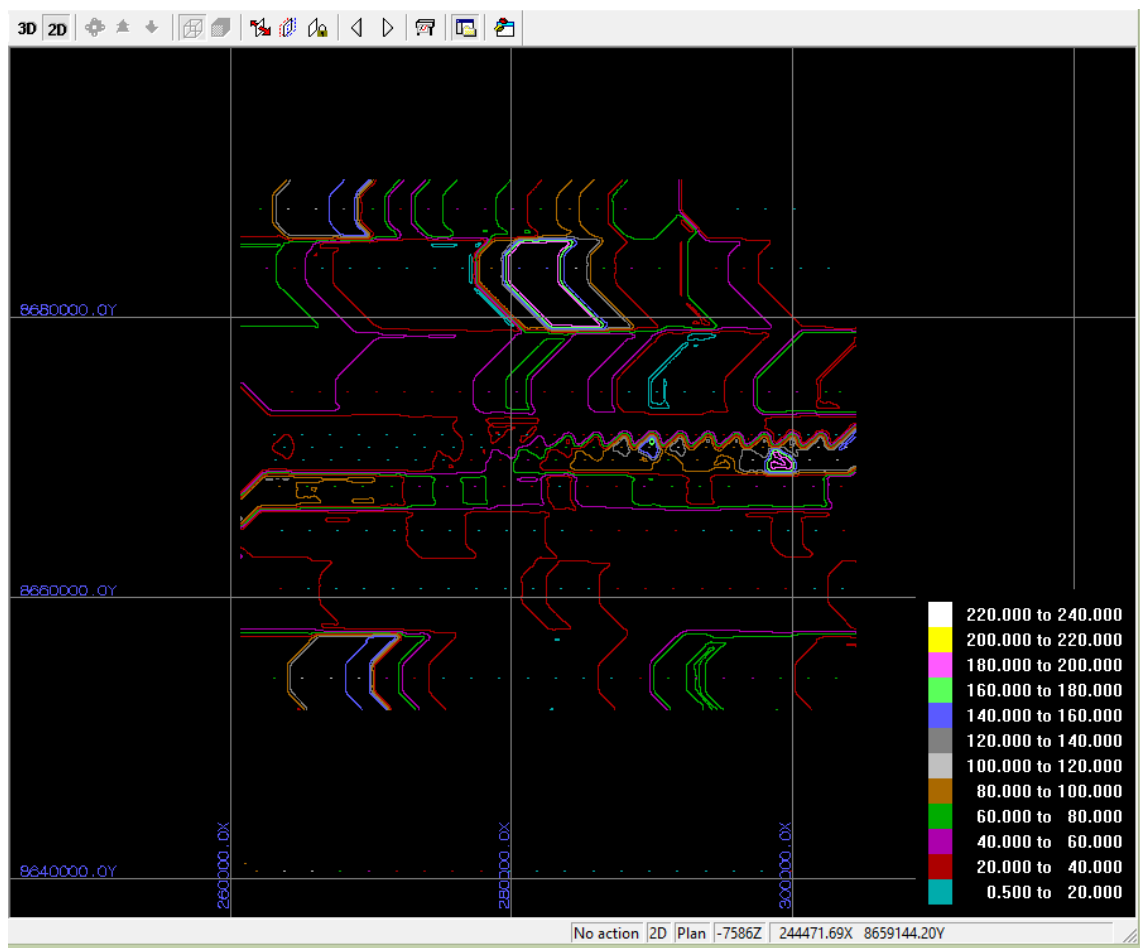
Estado del Aire	Rango del valor de medición del contaminante en $\mu\text{g} / \text{m}^3$			
	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
Según corresponde.	0 - 12.5	0 - 75	0 - 10	0 - 100
Según corresponde.	>12.6 - 25	>76 - 150	>11 - 20	>101 - 200
Según corresponde.	>25.1 - 125	>151 - 250	>21 - 500	>201 - 300
Según corresponde.	➤ 125	➤ 250	➤ 500	➤ 300

Fuente: Adaptado del Minam por el autor.

Para ver la independencia de los rangos de valores de concentración por cada contaminante, con el rango del INCA, nos indica que, si la medición promedio de PM₁₀ es de 70 $\mu\text{g} / \text{m}^3$, este pertenece al rango de valor de concentración entre 0 a 75, lo que significa que pertenece al rango de 0 a 50 del INCA, y la categoría del aire es buena el mismo que se representa por el color verde, como observamos el rango INCA es menor que el rango valor de concentración de componente atmosférico, en este caso PM₁₀.

b.- Resultados de concentración de PM₁₀, del modelo MDLE.

En la .Figura 77 adjunto, es la información que entrega el modelo MDLE, en la parte de la leyenda se muestran los rangos de las concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para PM₁₀, en una vista de planta incluyendo las coordenadas UTM de ubicación real.



.Figura No 77. Isovalores de PM₁₀ en lima metropolitana

Fuente: Información del modelo MDLE

Los isovalores que se muestran como resultado del modelo MDLE, son calculados a una altitud de 5000 m s.n.m., en la leyenda muestra la variación de los valores de las concentraciones de las partículas PM_{10} , esto indica que, el comportamiento de este elemento contaminante se dispersa siguiendo las características mostradas en los isovalores de la .Figura 77.

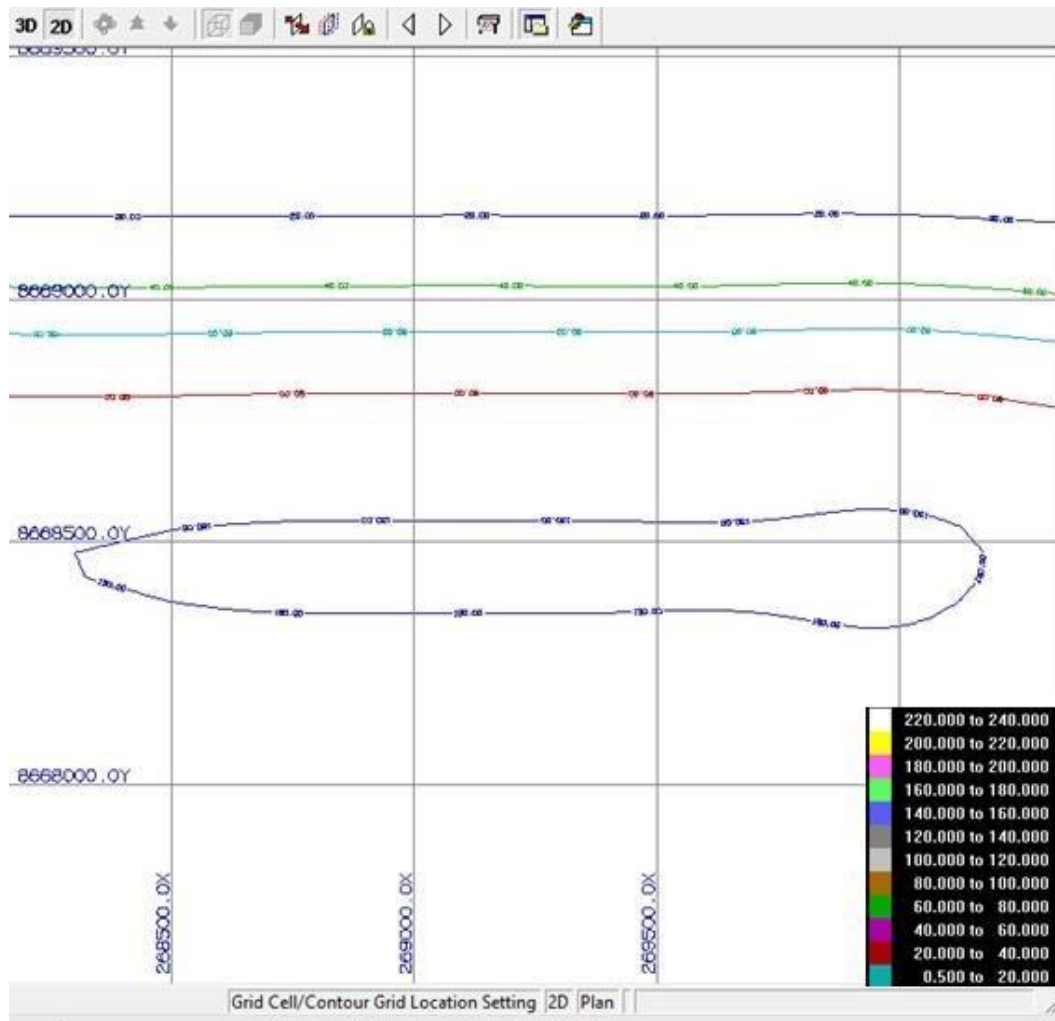
Los correspondientes valores mostrados en la parte inferior derecha de la .Figura No. 78, son rangos establecidos para cada isovalor de $\mu g / m^3$, de PM_{10} en a una altitud de 5 km de altitud en el espacio, en este caso es la zona, correspondiente a la zona espacial 2, que corresponde al rango superior a la Capa limite.



.Figura No 78. Variación de valores de PM_{10}

Fuente: Información del modelo MDLE

Los isovalores están representados por líneas de valores equivalentes, en la .Figura 79., observamos estas líneas, y para calificar el estado del aire con el INCA, compramos los rangos de la .Figura 80 con los rangos de Inca y PM_{10} . Una vista con mayor “zoom” del interfaz anterior se visualizan las dimensiones de los isovalores.



.Figura No. 79: Isovalores de PM₁₀ en µg /m³.

Fuente: Información del modelo MDLE

La línea de color rojo nos muestra el valor 20 µg /m³ de concentración de partículas PM₁₀, esto significa que según la .Tabla 21 y 22 un estado de calidad de aire “Bueno”.

.Tabla No. 21: Rango de valores de PM₁₀ y otros elementos

Estado del Aire	Rango del valor de medición del contaminante en $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
Según corresponde.	0 - 12.5	0 - 75	0 - 10	0 - 100
Según corresponde.	>12.6 - 25	>76 - 150	>11 - 20	>101 - 200
Según corresponde.	>25.1 - 125	>151 - 250	>21 - 500	>201 - 300
Según corresponde.	➤ 125	➤ 250	➤ 500	➤ 300

Fuente: Elaboración del autor

Corresponde al rango de valor de medición de 0 a 75, y al comparar con el rango de INCA según la .Tabla siguiente.

.Tabla No 22: Rango de valores INCA

Categoría del Nivel de Calidad del Aire	Índice de Calidad del Aire – INCA (Valores adimensionales)			
	PARA PM _{2.5}	PARA PM ₁₀	PARA SO ₂	PARA NO ₂
Buena	0 - 50	0 - 50	0 - 50	0 - 50
Moderada	>51 - 100	>51 - 100	>51 - 100	>51 - 100
Mala	>101 - 500	>101 - 167	>101 - 625	>100 - 150
Umbral de cuidado	➤ 500	➤ 300	➤ 625	➤ 150

Fuente: Elaboración del autor

Interpretación final, para el caso de PM₁₀, con el análisis realizado, mostramos que el rango de valor PM₁₀, de 0 – 75, corresponde al rango de INCA 0 – 50, el cual

pertenece indicador “buena”, referente al estado del aire en la zona interpretada, una vez más se observa que los rangos entre valores de los contaminantes atmosféricos y el INCA son independientes en sus cifras de intervalo de rango, pero relacionales en la calificación del estado de calidad del aire. Este procedimiento de análisis e interpretación es viable de realizar también para cada elemento contaminante y en la zona topográfica que deseamos, así como en la cota o altitud de elección, la versatilidad del modelo MDLE, permite diversificar, porque entrega información de concentración de elementos contaminantes en todo el ámbito topográfico de Lima metropolitana y a la altitud o cota de cada 100 metros hasta los 10 mil metros que es la única condición de frontera rígida.

6.2. Prueba de hipótesis

6.2.1. General

El Modelo de Localización Espacial de – MDLE, de los contaminantes atmosféricos encuentra los valores de los contaminantes atmosféricos del aire y a partir de estos valores se establecen los rangos de comparación con los niveles de calidad del aire a diferentes altitudes, según lo establecido por las condiciones de frontera o el alcance del modelo, el espacio 3D tiene las dimensiones geométricas de un paralelepípedo de base rectangular de 44 mil metros de ancho por 67 mil metros de largo y una altitud de 10 mil metros.

La interpolación de las concentraciones de los elementos contaminantes se realiza en el orden secuencial siguiente:

- 1.- Ingreso de datos de la estación, el mismo que se proyecta aplicando la interpolación de Stirling desde 10 m s.n.m. a 10,000 m s.n.m.
- 2.- Calculo de dispersión horizontal de concentraciones de los elementos contaminantes con el modelo gaussiano a quinientos metros de altitud de la superficie de cada estación.

3. Interpolación de valores de las concentraciones de dispersión horizontal hasta una altitud de diez mil metros de altitud, con el algoritmo de Stirling.
4. Interpolación geoespacial de valores de las concentraciones a través del algoritmo de Kriging, en el espacio 3D del alcance del modelo.

6.2.2. Prueba de la primera hipótesis específica

Los aspectos meteorológicos como la temperatura, presión, velocidad del viento así como la dirección de la misma, son parámetros de entrada del modelo y teniendo como línea base los niveles de calidad de aire a 10 metros de altitud superficial, el modelo, al ubicar las concentraciones de los contaminantes desde 10m de altitud hasta los 10 mil metros en el espacio atmosférico, muestra los niveles de calidad del aire cada 100 metros hasta llegar a los diez mil metros de altitud, para esto, involucra como parámetros importantes a t , p y v .

6.2.3. Prueba de la segunda hipótesis específica

Las características geográficas del área de estudio del modelo están relacionadas a los valores obtenidos en toda la superficie topográfica del ámbito del modelo y la zona de capa límite de la atmósfera el mismo que varía entre 200 a 1000 metros de altitud, correspondiendo estas cifras a las horas de día y de noche respectivamente, en esta zona 1 y 2 del espacio aéreo dentro de la troposfera, el modelo analiza el comportamiento de los contaminantes, relacionando las curvas de nivel topográfico, con las curvas isovaloricas de los contaminantes y las curvas isovaloricas en la capa límite y con estos datos identificar el nivel de calidad del aire en la cota indicada cuyo valor máximo es de 1914 m s.n.m. El mismo que se encuentra en la estación E22509.

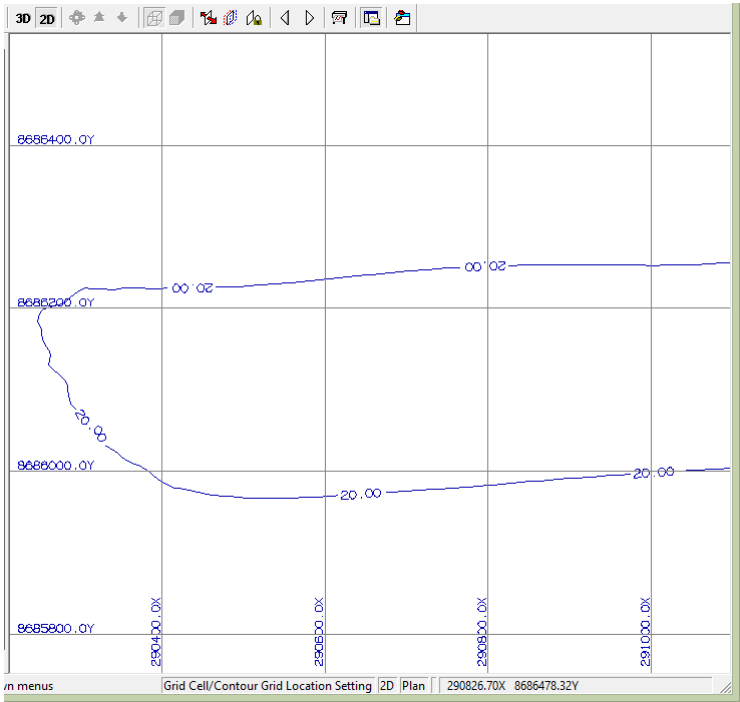
6.2.4. Prueba de la tercera hipótesis específica

El uso de los algoritmos en el Modelo de Localización Espacial – MDLE, mediante las iteraciones hace la interpolación de valores de los contaminantes atmosféricos a partir de los datos adquiridos de SENAMHI, estos datos son procesados mediante el algoritmo de Stirling así como el algoritmo de Kriging. El primero suaviza los cálculos a lo largo de las diez estaciones de monitoreo de SENAMHI donde $z = 1, \dots, 10000$ metros para cada estación, mientras que el algoritmo de Kriging, interpola en 3D en todo el alcance geométrico del modelo obteniendo los valores de los contaminantes atmosféricos en el interior del espacio geométrico del MDLE. Estos valores por ser georreferenciados permiten encontrar rangos establecidos en los indicadores de niveles de calidad de aire a diferentes altitudes hasta los 10 mil m s.n.m.

6.3. Presentación de resultados

6.3.1. Por elementos contaminantes.

PM 2.5, el valor de la medición de las partículas en suspensión muestra la .Figura No. 80, de $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$, aplicando los rangos de valores y la .Tabla INCA, se tiene los componentes del aire en esta parte del modelo que se muestra al desplegar la .Tabla No. 20



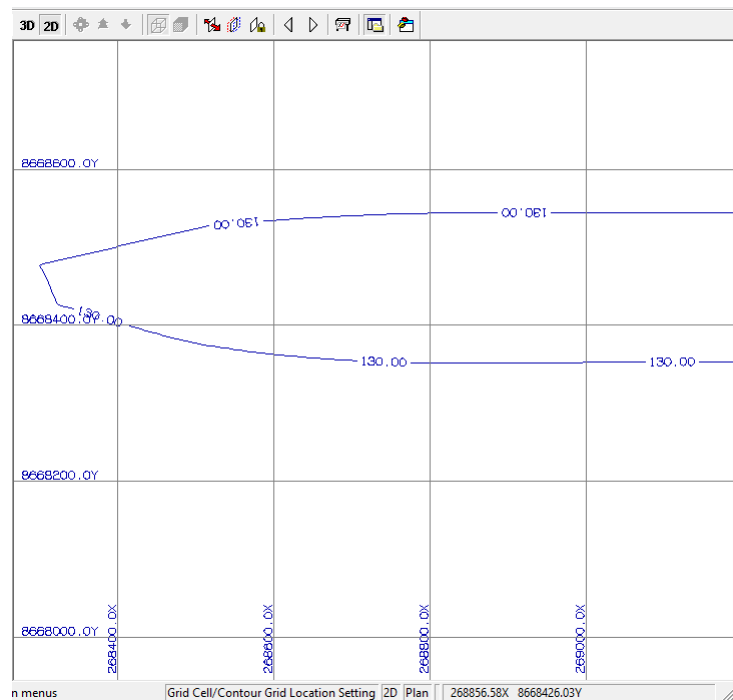
.Figura. No. 80: Isovalor de valor calculado por algoritmos.
Fuente: Información del Modelo MDLE

.Tabla No. 23: Identificación del estado del aire con valor obtenido del modelo para PM 2.5

Valor obtenido por el modelo para partículas PM 2.5 en $\mu\text{g} / \text{m}^3$	Categoría del estado del aire por presencia de PM 2.5			
	Rango de valor medido PM 2.5 en $\mu\text{g} / \text{m}^3$	Rango adimensional INCA para valor obtenido	Categoría de calidad de aire	Color de estado del aire según INCA
20	12.6 - 25	0 - 50	Buena	Verde
Estado del aire por correlación de rangos	➤	➤	➤	➤

Fuente: Información del Modelo MDLE

PM₁₀, el valor de la medición de las partículas en suspensión muestra la .Figura No. 81, de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el estado del aire, en esta parte del modelo y, se muestra en la .Tabla No. 24.



.Figura. No. 81: Isovalor de valor obtenido con modelo para PM₁₀

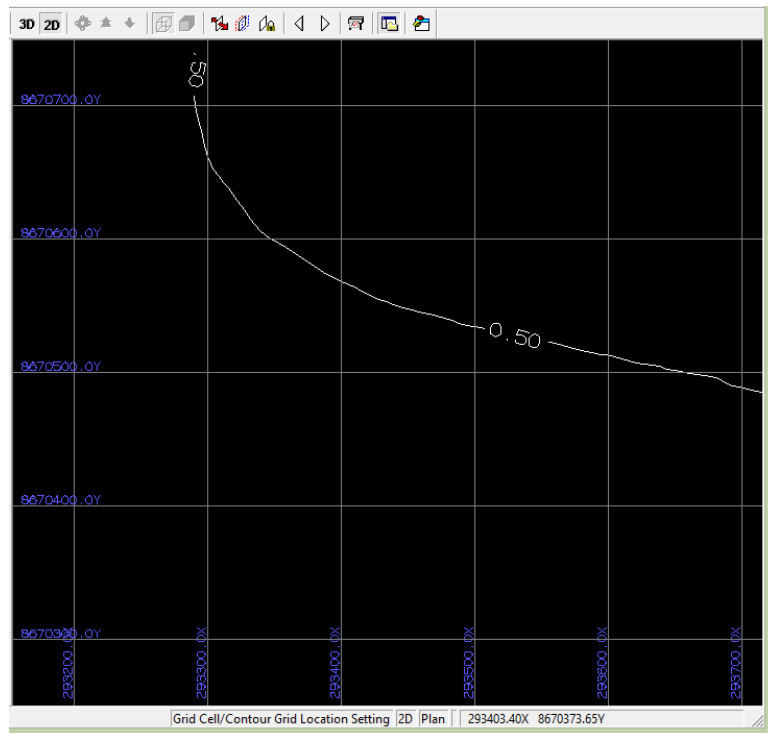
Fuente: Información del Modelo MDLE

.Tabla No. 24: Identificación de estado del aire con valor obtenido de modelo para PM₁₀.

Valor obtenido por el modelo para partículas PM ₁₀ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Estado calidad de aire por presencia de PM ₁₀			
	Rango de valor medido PM ₁₀ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango adimensional INCA para valor obtenido	Categoría de calidad de aire	Color de estado del aire según INCA
130	76 - 150	>101 - 167	Mala	Naranja
Estado del aire por correlación de rangos	➤	➤	➤	➤

Fuente: Información del Modelo MDLE

SO_x, el valor del óxido de azufre se muestra en la .Figura No. 82, de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el estado del aire en esta parte del modelo mostrado en la .Tabla. No. 25.



.Figura .No.83: Isovalor obtenido para NOx

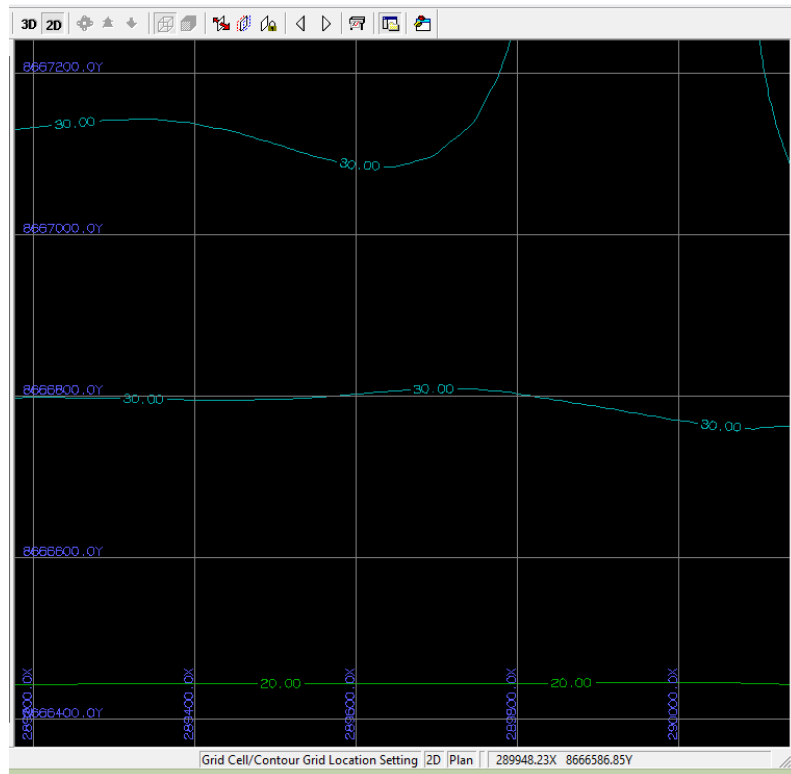
Fuente: Información del Modelo MDLE

.Tabla No. 26: Identificación de estado del aire con valor obtenido para NOx

Valor obtenido por el modelo para NOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Estado calidad de aire por presencia de NOx			
	Rango de valor medido NOx en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango adimensional INCA para valor obtenido	Categoría de calidad de aire	Color de estado del aire según INCA
0.5	0 - 10	0 - 100	Buena	Verde
Estado del aire por correlación de rangos	➤	➤	➤	➤

Fuente: Información del Modelo MDLE

O3, el valor del ozono se muestra en la .Figura No. 84, de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene, el estado del aire con el modelo, mostrado en la .Tabla No. 27.



.Figura. No. 84: Isovalor obtenido para O₃

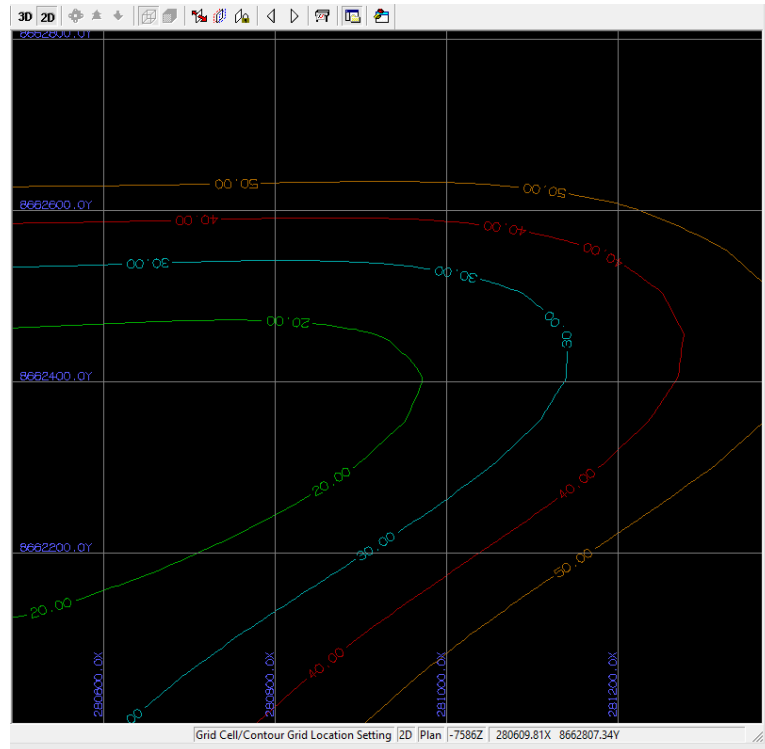
Fuente: Información del Modelo MDLE

.Tabla No. 27: Identificación de estado del aire con valor obtenido para O₃

Valor obtenido por el modelo para O ₃ en µg /m ³	Estado calidad de aire por presencia de O ₃			
	Rango de valor medido O ₃ en µg /m ³	Rango adimensional INCA para valor obtenido	Categoría de calidad de aire	Color de estado del aire según INCA
30	0 - 50	0 - 60	Buena	Verde
Estado del aire por correlación de rangos	➤	➤	➤	➤

Fuente: Información del Modelo MDLE

CO, el valor del óxido de carbono se muestra en la .Tabla No. 28, para 50 µg /m³, aplicando los rangos de valores e indicador INCA, se tiene que el aire en esta parte, el modelo muestra en la .Figura No. 85



.Figura No. 85: Isovalor obtenido para CO
Fuente: Información del Modelo MDLE

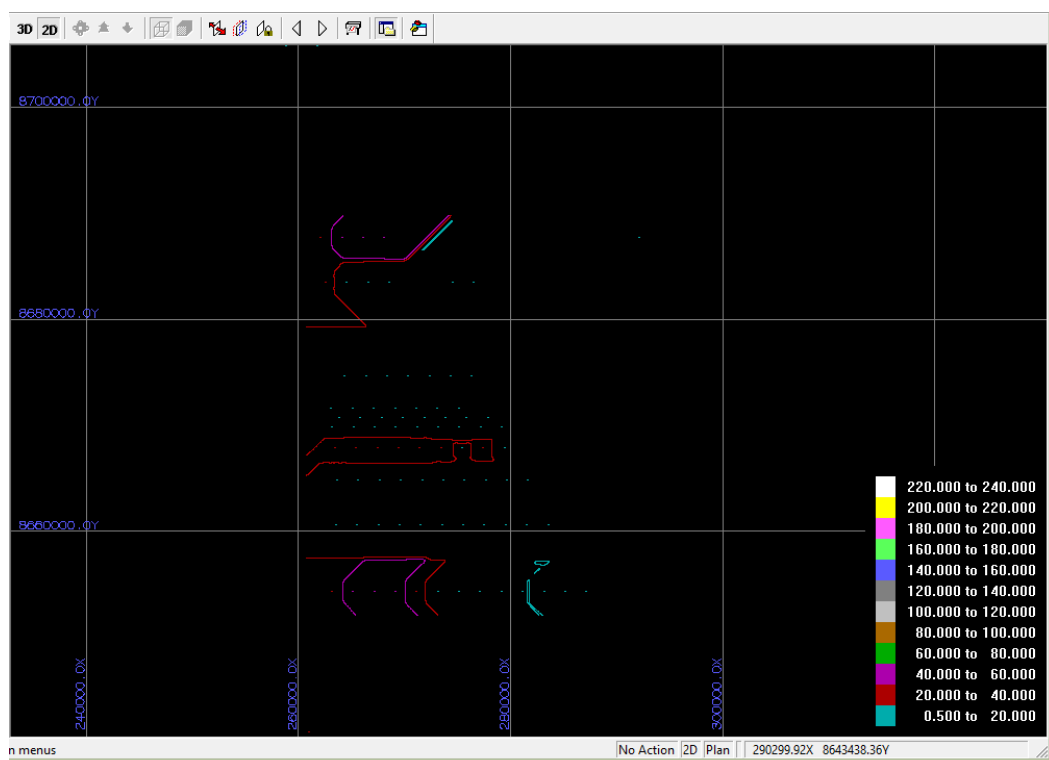
.Tabla No. 28: Identificación de estado del aire con valor obtenido para CO

Valor obtenido por el modelo para CO en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Estado calidad de aire por presencia de CO			
	Rango de valor medido CO en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Rango adimensional INCA para valor obtenido	Categoría de calidad de aire	Color de estado del aire según INCA
50	0 - 500	0 - 1000	Moderada	Verde
Estado del aire por correlación de rangos	➤	➤	➤	➤

Fuente: Información del Modelo MDLE

6.3.2. Por zona espacial atmosférica en m s.n.m.

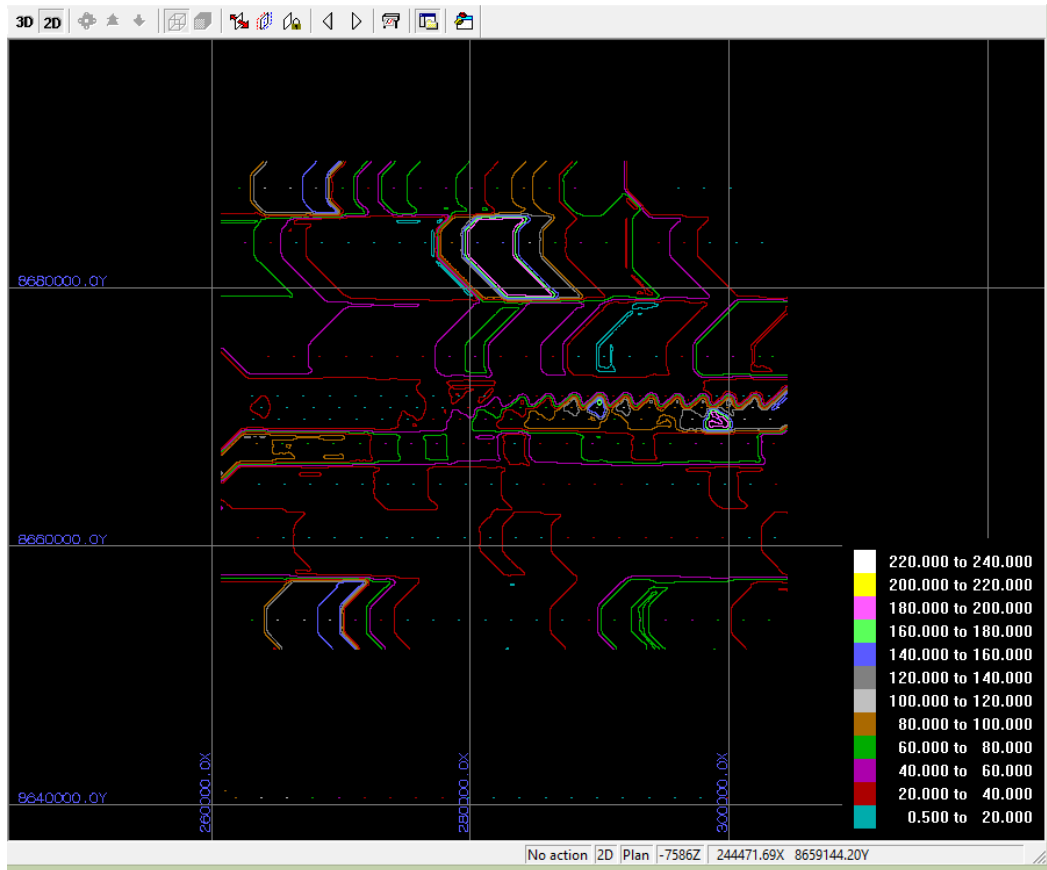
PM₁₀ a nivel del mar, las mediciones de los contaminantes se realizan a 10 metros de altitud, pero el modelo considera los intervalos de medida cada 100 metros y elegimos la vista de planta a la altitud de 40 metros donde los valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se observan en la .Figura No. 86., en forma de isovalores de Lima y la .Figura No. 87, muestra estas mismas concentraciones a 9000 metros de altitud.



.Figura No. 86: Isovalores obtenidos para PM₁₀ a 400 m s.n.m.

Fuente: Información del Modelo MDLE

La información del modelo muestra en la .Figura No 88, la concentración del PM₁₀ en la zona este no se aprecian debido a la presencia topográfica entrando al este, el plano de planta corta al relieve topográfico.



.Figura No. 87: Isovalores obtenido para PM₁₀ a 9000 msnm

Fuente: Información del Modelo MDLE

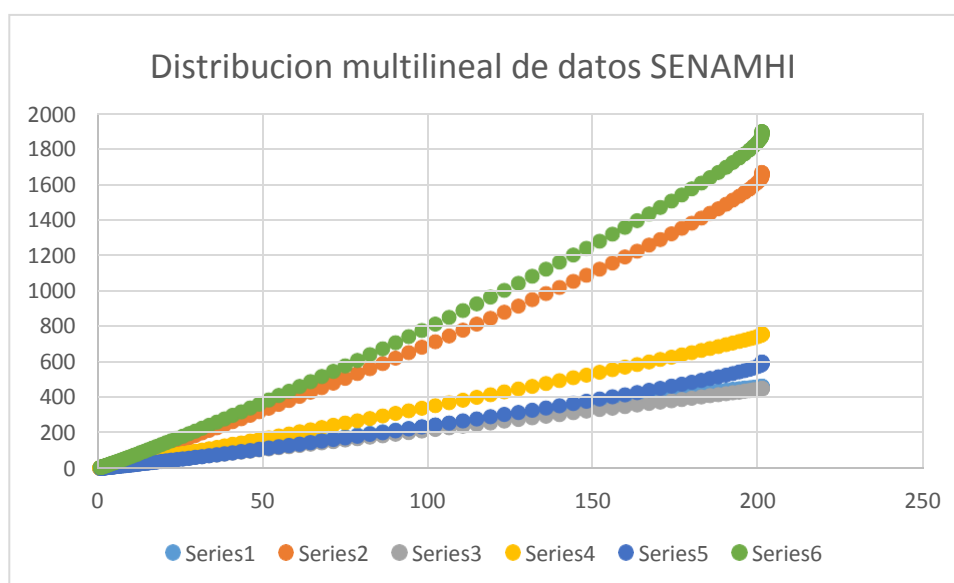
La .Figura No. 87, muestra los isovalores en toda el área del modelo, a una altitud de 9Km, a esta altitud, la distribución en el espacio 3D de las concentraciones tienen un comportamiento tal como se observa.

6.4. Validación del modelo MDLE

6.4.1. Validación multivariable

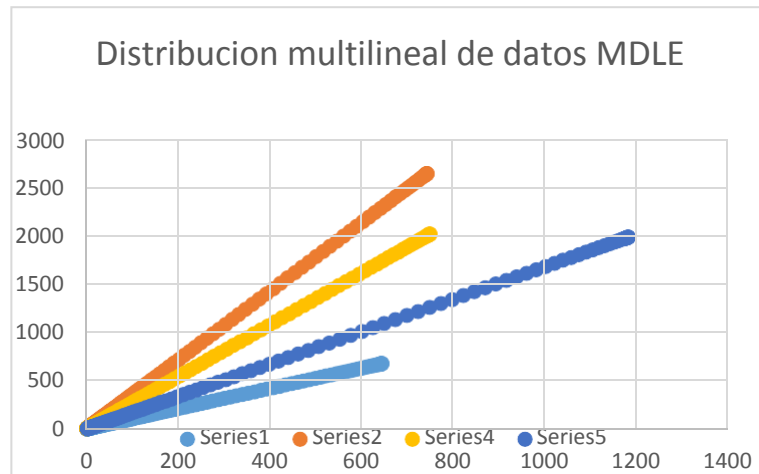
La naturaleza multivariable del modelo MDLE, implica ver el comportamiento de las concentraciones por elemento contaminante en las 10 estaciones de monitoreo de SENAMHI y los datos procesados por la interpolación de Stirling, la comparación de distribución de datos originales de las estaciones y los procesados por el algoritmo de Stirling nos muestra la .Tabla No. 29, indicando el nivel de variabilidad en su distribución espacial de los datos adquiridos, y el .Tabla No. 30, muestra dicha variabilidad de distribución espacial de los datos procesados por la interpolación con el algoritmo de Stirling en el modelo MDLE.

.Tabla No. 29: Distribución multilínea de datos adquiridos a SENAMHI



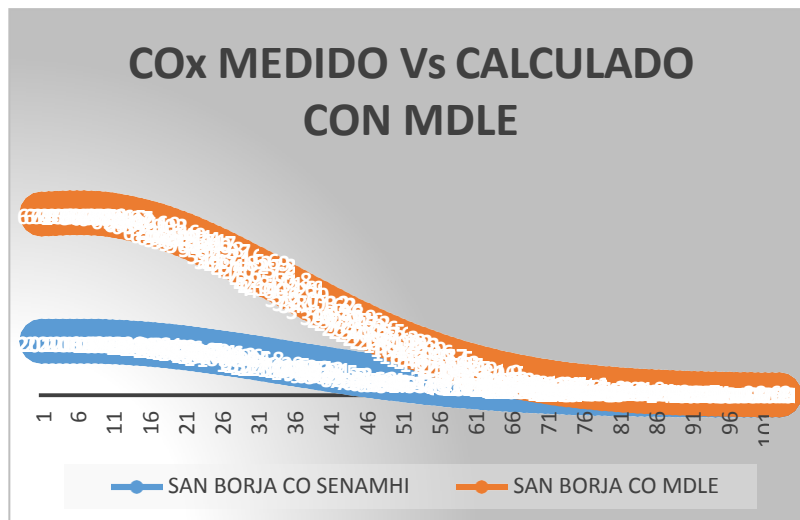
Fuente: Elaboración del Autor

La similitud de las formas que se presentan de ambas gráficas, muestran que tanto los datos adquiridos así como los datos procesados por el algoritmo de Stirling para el ingreso (input) al MDLE, mantienen el mismo sesgo estadístico, esto significa que, la variabilidad entre ambos datos es mínima.

.Tabla No. 30: Distribución multilinear de datos de Stirling

Fuente: Elaboración del Autor

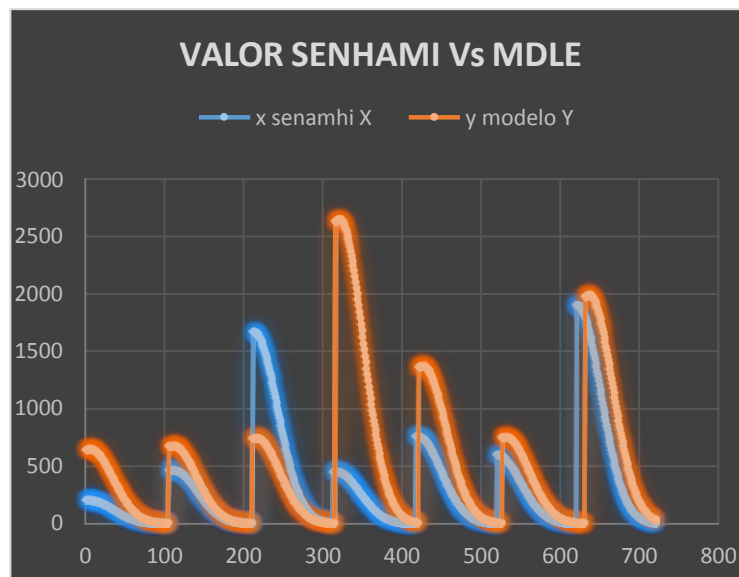
El comportamiento de la tendencia de datos para una sola variable en este caso para el COx, medido por SENAMHI y la concentración de Cox, obtenido con el algoritmo de Stirling, muestran en la .Figura No. 88 la misma tendencia funcional dando consistencia a la validación estadística de los datos del modelo.

**.Figura No. 88: Tendencia unilineal de datos para el Cox.**

Fuente: Elaboración del Autor

6.4.2. Validación Geoestadística del MDLE

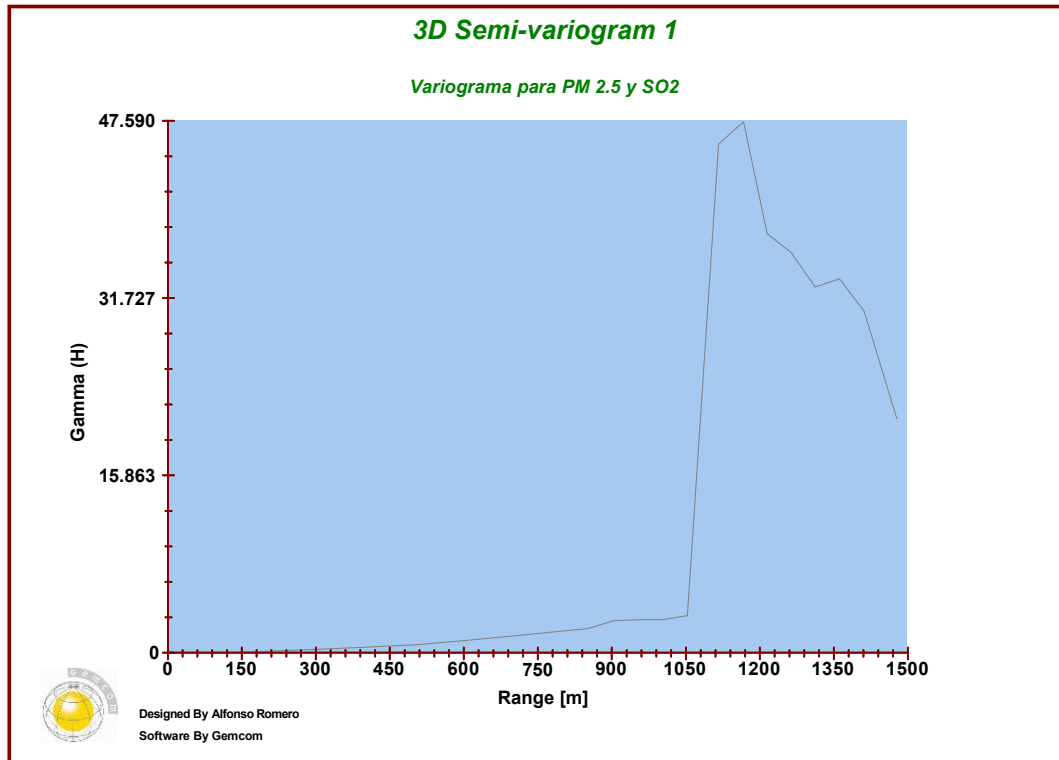
La validación del modelo MDLE, de naturaleza geoespacial en el presente documento, emplea a la función geoestadística de Semivariograma espacial o 3D, la .Figura No. 89, indica la característica de los semivariogramas en las variables del modelo por tener las variables georreferenciados, en este caso las variables utilizadas en el modelo tienen esta caracterización principal que mostramos en el gráfico.



.Figura No. 89: Saltos de variograma de la Geoestadística del MDLE

Fuente: Elaboración del Autor

El gráfico se observa el comportamiento geoespacial de los datos al aplicar el algoritmo de Stirling, y claramente la amplitud de tamaño de los datos del modelo son coincidentes con el gran volumen de datos que se genera a partir de los datos adquiridos, manteniendo el sesgo estadístico y la amplitud geoestadística coincidente con el sesgo estadístico y al ser mínimo en diferencia de sesgos entre el estadístico y el geoestadístico el nivel de error en el proceso de cálculo es menor al 5% indicando que son datos consistentes, aquellos datos que se obtienen como resultado de iterar el algoritmo de Stirling.



.Figura No. 90: Semivariograma 3D componentes de atmosféricos PM y SO

Fuente: Información del MDLE

La similitud funcional $F(x_i, y_j, z_k)$ con nomenclatura $Z'(x_i, y_j, z_k)$, que presentan las gráficas No. 89 y 90, muestran sus tendencias similares, siendo el primero la gráfica de los datos de entrada y el segundo de la información que entrega el modelo MDLE, esta relación funcional, valida la consistencia y robustez del modelo MDLE con variables geoespaciales a través del uso de la función semivariograma 3D de las variables geoespaciales, conocido también como validación geoestadística de los modelos.

CONCLUSIONES

1. El Modelo de Localización Espacial – MDLE, de los contaminantes atmosféricos obtiene valores de las concentraciones en el espacio geométrico y, precisa dichas valores a diferentes altitudes cada 500 m s.nm. hasta los 10 mil metros sobre el nivel del mar, representado en el modelo por el punto $P(x) = (x_i, y_j, z_k)$, donde z_k , se define como la longitud de la troposfera.
2. Los parámetros climáticos en el modelo, como variables aleatorios entre los principales son la velocidad y dirección del viento así, como, la variación de la temperatura, el primero por su orientación direccional y el otro por su relación altitud y temperatura.
3. En el modelo MDLE, los elementos contaminantes en relación a las presencia de los aspectos geográficos, tienen la distribución de un modelo de dispersión, es decir, muy cercanos a la superficie de la tierra, y a altitudes mayores a los 10 metros, el comportamiento es similar a altitudes mayores del espacio troposférico.
4. La contribución de los algoritmos en el MODELO DE LOCALIZACION ESPACIAL – MDLE, se verifica en los procesos de cálculo de las cantidades por contaminantes en la atmosfera a través de la interpolación de valores medidos y adquiridos del SENAMHI, estos valores son procesados mediante el algoritmo de Stirling y el algoritmo de Kriging. El primero suaviza los cálculos a lo largo de las diez estaciones de monitoreo de SENAMHI a partir de datos tomados a 10 metros de altitud e interpolados hasta los 10 mil metros de altitud para cada estación, mientras que el algoritmo de Kriging, interpola en 3D dentro del espacio establecido por el MDLE.

RECOMENDACIONES

1. El modelo, por su adaptabilidad a la réplica, es de fácil aplicación en diferentes espacios geográficos del planeta, y en consecuencia, la identificación de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el espacio troposférico, se recomienda su réplica.
2. Los valores de la gradiente geotérmica en la atmósfera, está en proceso de cambio, el valor promedio que indican a variado, demostrando que de 0.94 grados Celsius cada 100 metros a 1.30 grados Celsius por cada 100 metros de diferencia, lo que implica recomendar su revisión.
3. Los valores encontrados en el modelo MDLE de las concentraciones de los contaminantes, muestran una diferencia, debido a altitudes mayores, la tendencia es simétrica de los valores, razón por la cual recomendamos investigaciones futuras en la zona de capa límite
4. Los algoritmos utilizados en las interpolaciones de los valores de concentración de los elementos contaminantes aplicados en este estudio precisan dichas concentraciones en el espacio atmosférico y tratamiento de variables geoespaciales, por tanto es recomendable su aplicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **BUNGE, MARIO (1999)** La investigación Científica. Su Estrategia y su Filosofía. Editorial ARIEL. Barcelona – España.
2. **GARCÍA FERNÁNDEZ, DORA (2006)**. Metodología del Trabajo de Investigación. Editorial Trillas S.A.de C.V. México.
3. **GONZALES, H. (2015)**. Análisis de calidad del aire. V congreso de ingeniería ambiental de Chile.
4. **HERNÁNDEZ SAMPIERI, ROBERTO (2010)**. Metodología de la Investigación. McGraw-Hill/ interamericana Editores S. A. México.
5. **KERLINGER, F. (1988)**. Investigación del comportamiento. Técnicas y métodos. México: Editorial Interamericana.
6. **MARTINEZ, ERNESTO (2004)**. Contaminacion atmosférica. Universidad de Castilla. ISBN 8484273245, P.13, 39
7. **MANAHAN, ESTANLEY (2007)**. Introduccion a la QuimicaAmbental, Edit. Reverte. 402 p.
8. **MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO MARINO**. ([http:// www. mma. es/ portal/ secciones/ calidad_contaminacion/ atmosfera/ emisiones/programa_techos. htm](http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/atmosfera/emisiones/programa_techos.htm))
9. **MENDOZA, V. (2014)**. Algoritmos de modelación y predicción cuadrática. Edit. Comité de matemática Chile.
10. **MEJÍA, E. (2005)** Metodología de la investigación científica. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
11. **PISCOYA, LUIS (2003)** Investigación científica y educacional, un enfoque epistemológico Amaru Editores, Perú
12. **POPPER, KARL (1994)** La lógica de la investigación científica. Editorial Tecnos, España.
13. **RODRIGUEZ RIVAS, MANUEL (1991)** Teoría y diseño de la investigación científica, Ediciones Atusparia, Perú
14. **RODRIGUEZ RIVAS, MANUEL (2002)** La ciencia ,Fondo editorial de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega, Perú
15. **SALVADOR H., MERCADO. (2003)** ¿Cómo hacer una Tesis? 3.^a Ed. Limusa Noriega Editores México.

- 16. SPEDDING, JOSEPH.** Contaminación atmosférica (1981). ISBN 84-291- 7506-7. Edit. Reverte. p. 33.
- 17. SANCHEZ, VICENTE (1982).** El proceso de toma de decisiones y organización de la evaluación. México.
- 18. VÁSQUEZ, M.R. (1997).** Flórmula de las Reservas Biológicas de Iquitos, Perú. Allpahuayo - Mishana. Missouri Botanical Garden. 1046 p.
- 19. LOZADA C, PUGA (20174).** Formula de interpolación de Stirling. Pucp. Lima, p. 176 – 186.
- 20. JACOBSON, MARK (2002).** Atmospheric Pollution: History, Sciencie, and Regulation. New York: Cambrige University Press.
- 21. KORC, M. (2009).** Diagnóstico de las emisiones del parque automotor del área metropolitana de Lima y callao. XXVII Congreso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.
- 22. SÁNCHEZ CARLESSI, HUGO. (1998).** Metodología y Diseño de la investigación Científica. Editorial Mantaro-Perú.
- 23. TAMAYO, M (2005)** Metodología formal de la investigación científica. 2ª ed. México: Limusa.
- 24. M. ALFARO, (1996).** Estadística. Departamento de Ingeniería Matemática, U. de Chile, 1996.
- 25. M. ALFARO, (2003).** Introducción al Muestreo Minero. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, 2003.
- 26. H. CRAMER, (1955).** Métodos Matemáticos de Estadística. Aguilar, Madrid, 1955.
- 27. G. MATHERON (2005).** Curso de Geoestadística. Ecole Nationale Supérieure des Mines de París, 2005.
- 28. MATHERON (2005).** La Teoría de las Variables Regionalizadas y sus Aplicaciones. ENS. De Minas de París. 2005.
- 29. A. JOURNEL (1978).** Mining Geostatistics. Academic Press, 1978.
- 30. J. P CHILÉS Y GEOSTATISTICS,(2000).** Modeling Spatial Uncertainty. Wiley University , 2000.

ANEXOS I

Nomenclatura de estaciones de medición de SENAMHI

- 1.- Estación de monitoreo 1: Estación Puente Piedra
- 2.- Estación de monitoreo 2: Estación Carabaylo
- 3.- Estación de monitoreo 3: Estación San Juan de Lurigancho
- 4.- Estación de monitoreo 4: Estación San Martín de Porres
- 5.- Estación de monitoreo 5: Estación Huachipa
- 6.- Estación de monitoreo 6: Estación Ate
- 7.- Estación de monitoreo 7: Estación Santa Anita
- 8.- Estación de monitoreo 8: Estación Campo de Marte
- 9.- Estación de monitoreo 9: Estación San Borja
- 10.- Estación de monitoreo 10: Estación Villa María del Triunfo

ANEXOS II: MATRIZ DE CONSISTENCIA

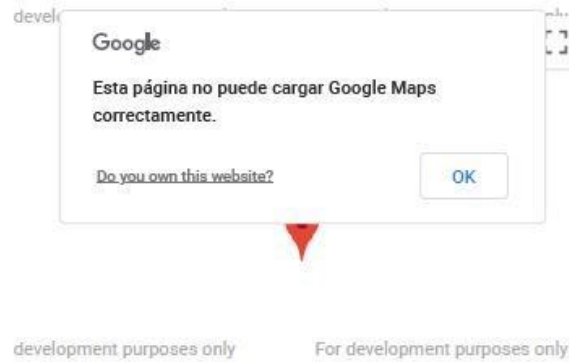
Título	Definición del Problema	Objetivos	Formulación de Hipótesis	Variables	Indicadores	Metodología	Población, Muestra	Técnicas Instrumentos
“PROPUESTA DEL MODELO DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LIMA”	Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable independiente (V1)		Tipo de investigación	Población	Técnica
					Aspectos meteorológicos	Aplicada	Totalidad de las estaciones de medida	Iteraciones numéricas
	¿En qué medida el modelo de localización espacial (MDLE), de contaminantes atmosférica, precisa a distintas altitudes, los niveles de calidad del aire en la ciudad de Lima?	Establecer la precisión a distintas altitudes de las cantidades de los contaminantes atmosféricos con los niveles de calidad del aire en la ciudad de Lima.	El modelo de localización espacial (MDLE), de contaminantes atmosféricos, precisa a distintas altitudes, los niveles de calidad del aire en la ciudad de Lima.	Modelo de localización espacial de contaminantes atmosféricos.	Características geográficas			
		Objetivos específicos		Variable dependiente (V2)	Uso de algoritmos de precisión	Diseño de la investigación	Muestra	Instrumento
	Problemas Específicos		Hipótesis específicas			Experimental	Toda la población	Algoritmos de Stirling y kriging
		Comprobar la relación de influencia de los aspectos						

	<p>¿Cómo se relaciona los aspectos meteorológicos en el modelo, con la calidad del aire en la ciudad de Lima?</p> <p>¿En qué medida las características geográficas en el modelo, se relacionan con la calidad del aire en la ciudad de Lima?</p> <p>¿Cómo contribuye el uso de algoritmos en el modelo, con los niveles en la calidad del aire en la ciudad de Lima?</p> <p>.....</p>	<p>meteorológicos considerados en el modelo, en la calidad del aire en la ciudad de Lima</p> <p>Establecer las variables de las características geográficas en el modelo, y su relacionan con la calidad del aire en la ciudad de Lima</p> <p>Verificar la contribución de los algoritmos en la ubicación precisa y georreferenciada de las cantidades de los contaminantes atmosféricos en el modelo, con los niveles de la calidad del aire en la ciudad de Lima.</p>	<p>Los aspectos meteorológicos considerados en el modelo como la presión, temperatura y la velocidad de viento influyen directamente en la calidad del aire en la ciudad de Lima</p> <p>Las características geográficas en el modelo se, relacionan por la variación de la altitud y relieve topográfico directamente con la calidad del aire en la ciudad de Lima</p> <p>Los algoritmos de Stirling y Kriging en el modelo, contribuyen en la ubicación precisa y georreferenciada de las concentraciones de los</p>	<p>Calidad del aire en la ciudad de Lima.</p>	<p>Calculo de concentraciones de contaminantes e identificación de estado de aire con Estándares de Calidad de aire – ECA</p> <p>Identificación de estado de calidad de aire en base a valores de concentraciones de contaminantes y su comparación con el rango de Indicadores</p>			
--	--	---	---	---	---	--	--	--

			contaminantes con cuyos datos se establece los niveles de la calidad del aire en la ciudad de Lima.		de calidad de aire – INCA.			
--	--	--	--	--	-------------------------------	--	--	--

ANEXO III: Datos generales de estaciones de medición de contaminantes del aire – SENAMHI

ESTACION PUENTE PIEDRA



Información general

PROPIETARIO	SENAMHI
OPERADOR	Dirección de Redes de Observación y Datos
PROVINCIA	LIMA
DISTRITO	PUENTE PIEDRA
COORDENADAS	-11.86325 -77.07413
RECEPCIÓN DE DATOS	En Línea
INICIO DE OPERACIÓN	03/12/2014



VISTA PANORÁMICA



VISTA NORTE



VISTA ESTE



Parámetros meteorológicos

Parámetro	Frecuencia	Altura de medición	Fecha primer registro	Fecha último registro	Técnica de medición	Marca	Gráficos
Temperatura ambiente (Temperatura - °C)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Velocidad del viento (Vel. viento - m/s)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Dirección del viento (Dir. viento - °)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Humedad relativa del aire (Humedad relativa - %)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Precipitación	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	

Instrumentos de medición utilizados

Parámetro contaminantes	Fecha primer registro	Fecha último registro	Metodo	Técnica	Marca
Material Particulado menor a 10 micras (PM10)	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5)	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Dioxido de Azufre SO ₂	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Fluorescencia UV Analizador T100	TELEDYNE
Oxidos de Nitrogeno NO ₂	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Quimioluminiscencia Analizador T200	TELEDYNE
Monoxido de Carbono CO	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300	TELEDYNE
Ozono Troposferico O ₃	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Fotometria UV Analizador T400	TELEDYNE

ESTACION VILLA MARIA DEL TRIUNFO



Información general

PROPIETARIO	SENAMHI
OPERADOR	Dirección de Redes de Observación y Datos
PROVINCIA	LIMA
DISTRITO	VILLA MARIA DEL TRIUNFO
COORDENADAS	-12.16639 -76.92
RECEPCIÓN DE DATOS	En Línea
INICIO DE OPERACIÓN	



VISTA PANORAMICA



VISTA NORTE



VISTA ESTE



VISTA OESTE



VISTA SUR



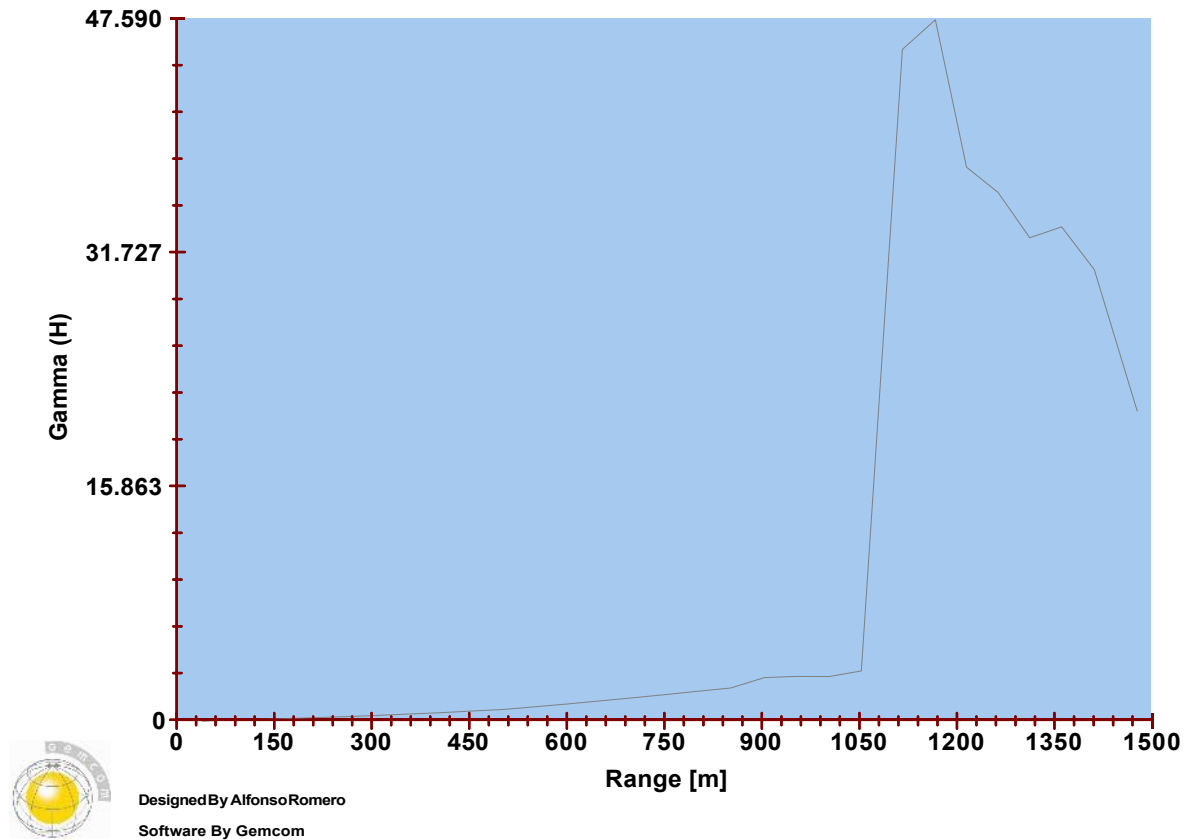
Parámetros meteorológicos

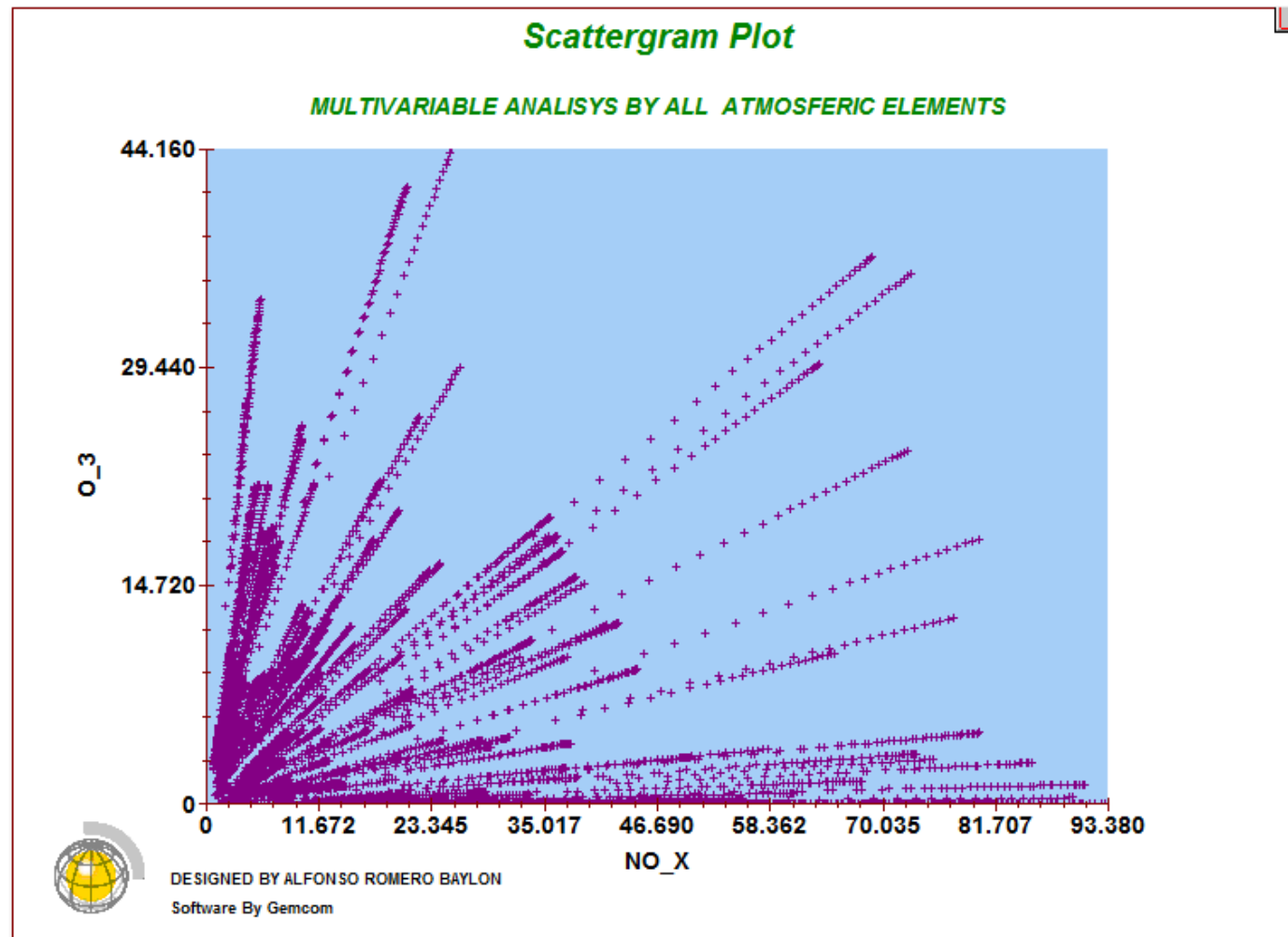
Parámetro	Frecuencia	Altura de medición	Fecha primer registro	Fecha último registro	Técnica de medición	Marca	Gráficos
Temperatura ambiente (Temperatura - °C)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Velocidad del viento (Vel. viento - m/s)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Dirección del viento (Dir. viento - °)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Humedad relativa del aire (Humedad relativa - %)	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	
Precipitación	Horario	1 m.		20/11/2018	Automatico	VAISALA	

Instrumentos de medición utilizados

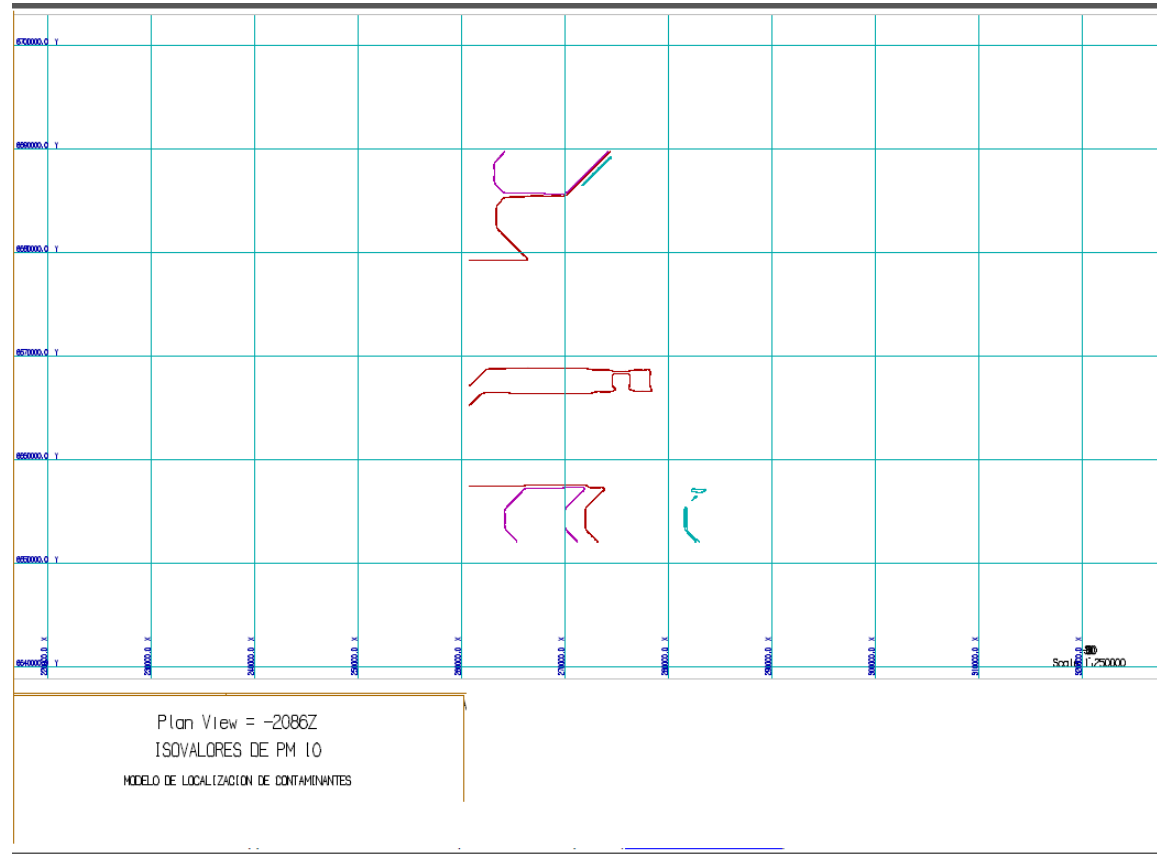
Parámetro contaminantes	Fecha primer registro	Fecha último registro	Metodo	Técnica	Marca
Material Particulado menor a 10 micras (PM10)	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5)	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Atenuacion de Rayos Beta Monitor 5014i	THERMO SCIENTIFIC
Dioxido de Azufre SO ₂	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Fluorescencia UV Analizador T100	TELEDYNE
Oxidos de Nitrogeno NO ₂	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Quimioluminiscencia Analizador T200	TELEDYNE
Monoxido de Carbono CO	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Infrarrojo No Dispersivo Analizador T300	TELEDYNE
Ozono Troposferico O ₃	03/12/2014	30/08/2019	Automatico	Fotometria UV Analizador T400	TELEDYNE

ANEXO IV: Resultados diversos del modelo MDLE

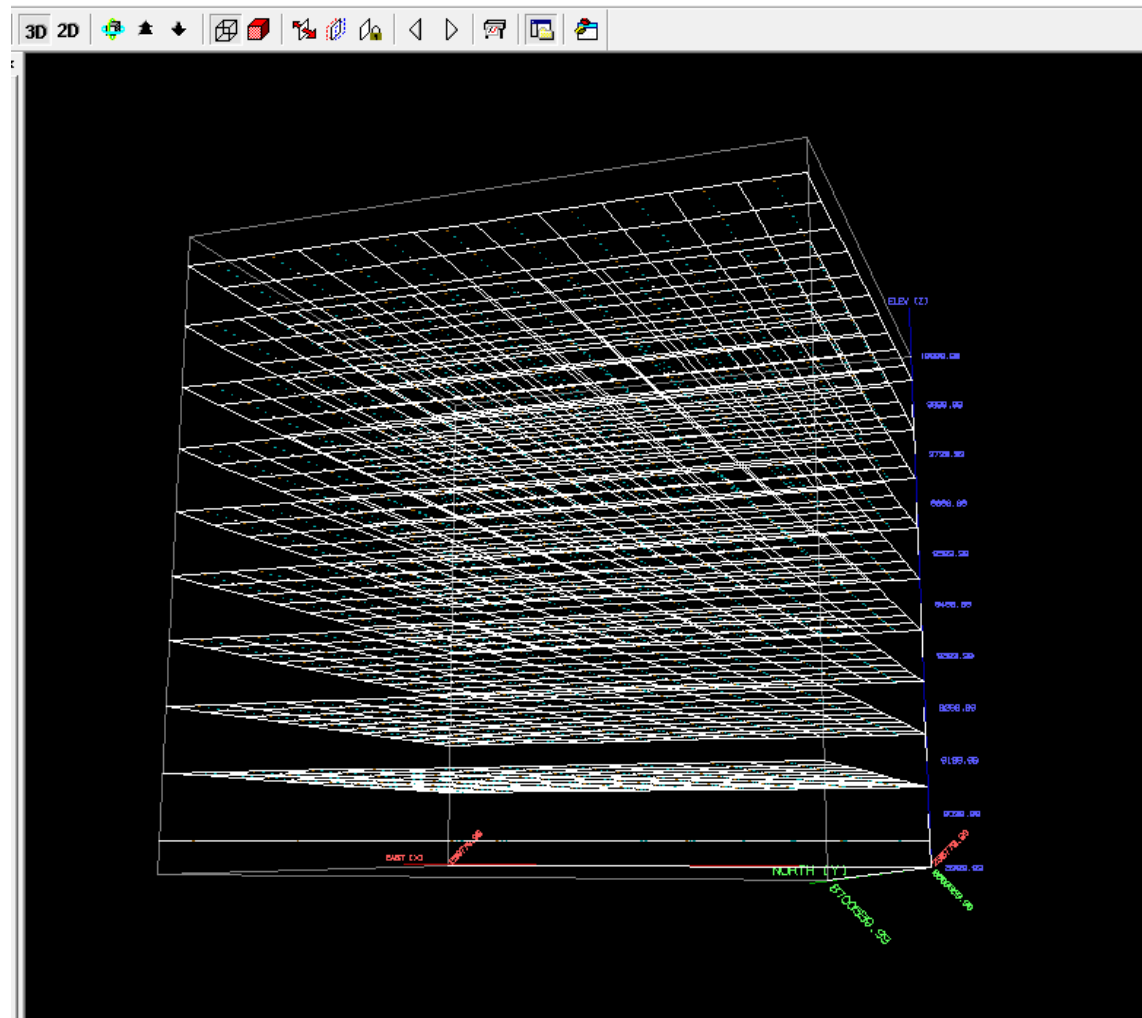
3D Semi-variogram 1*Variograma para PM 2.5 y SO2*



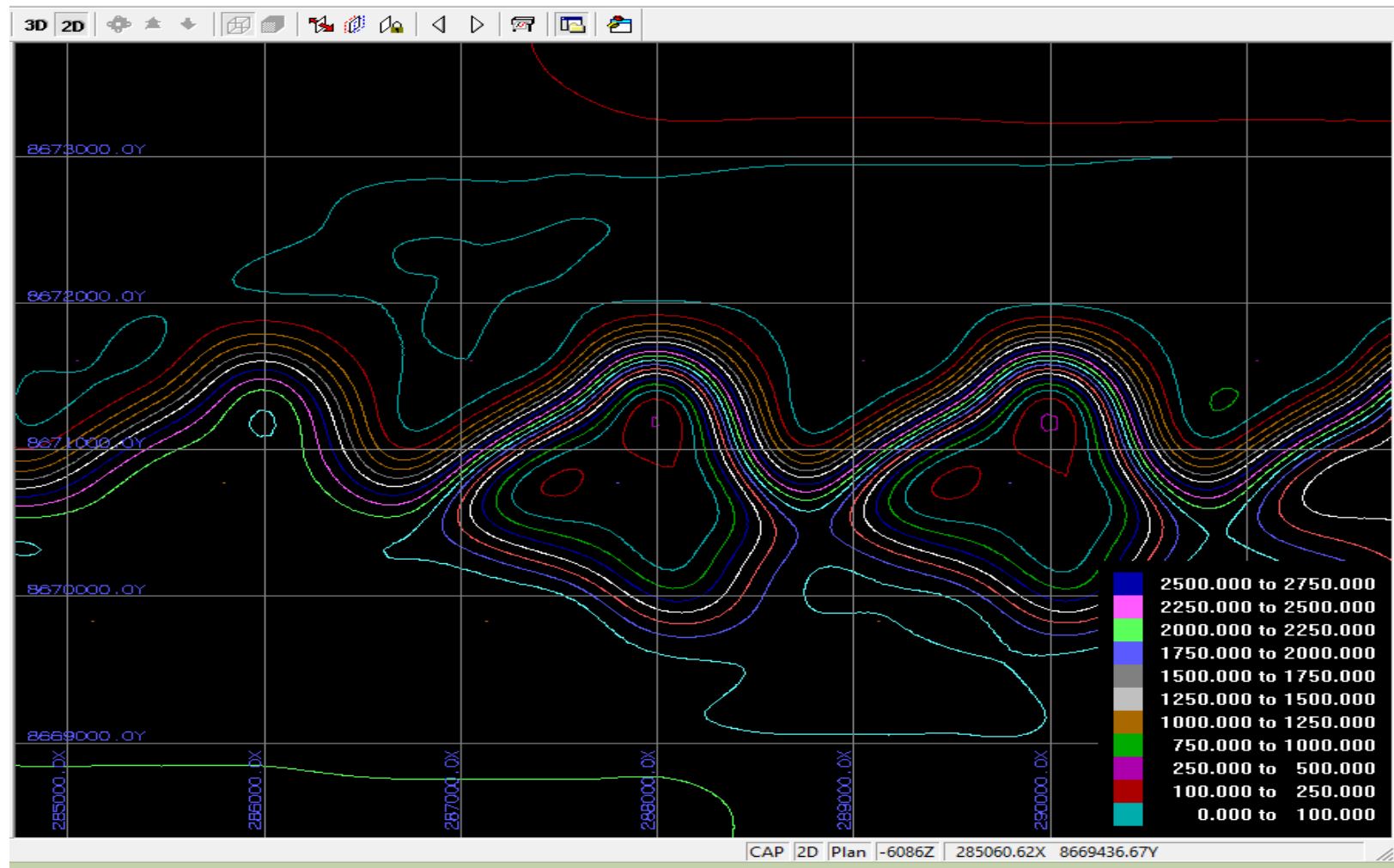
Isovalores de PM 10 a 8 mil msnm.



Condiciones de frontera 3D del modelo MDLE



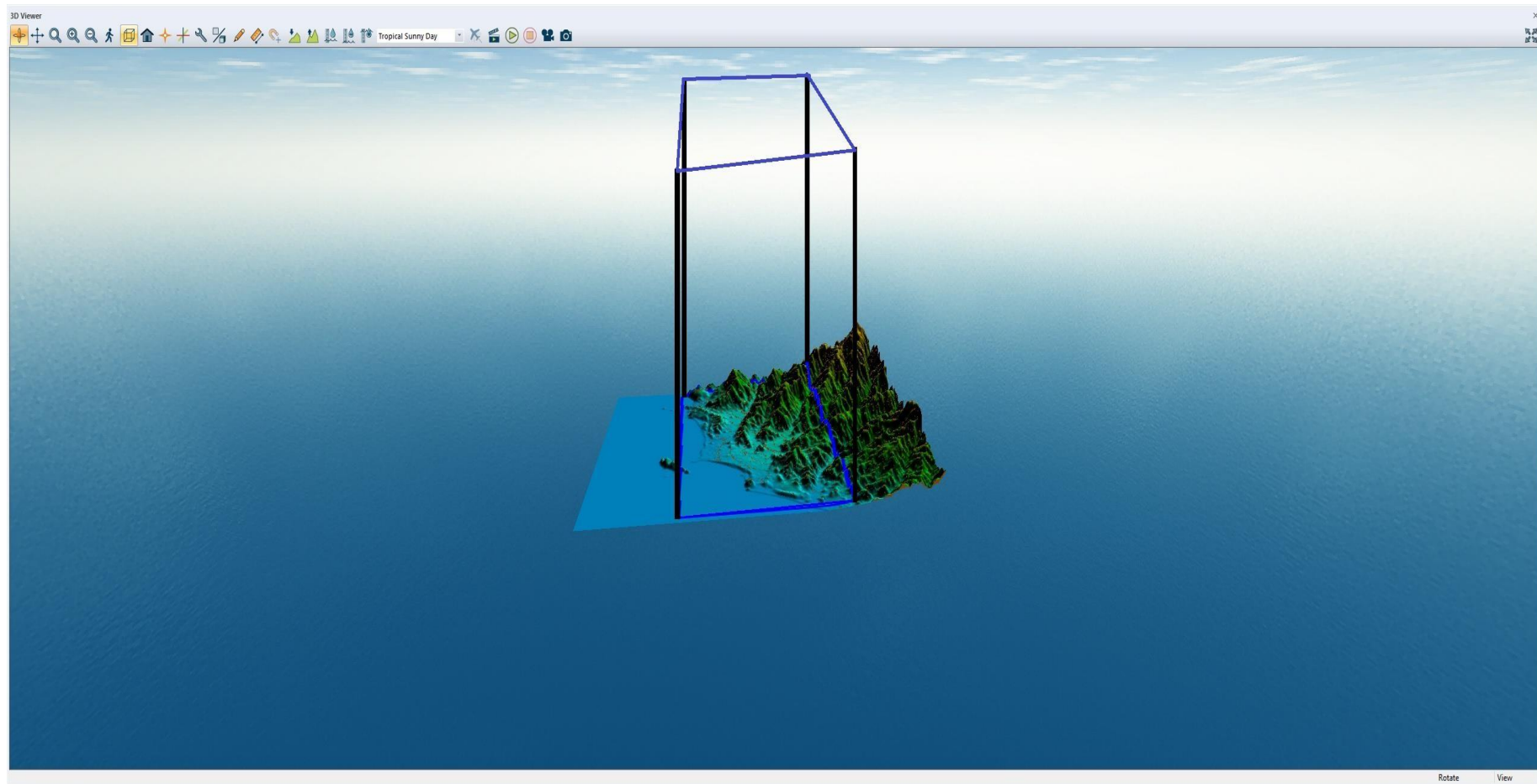
ISOVALORES DE CO EN 2750 M.S.NM



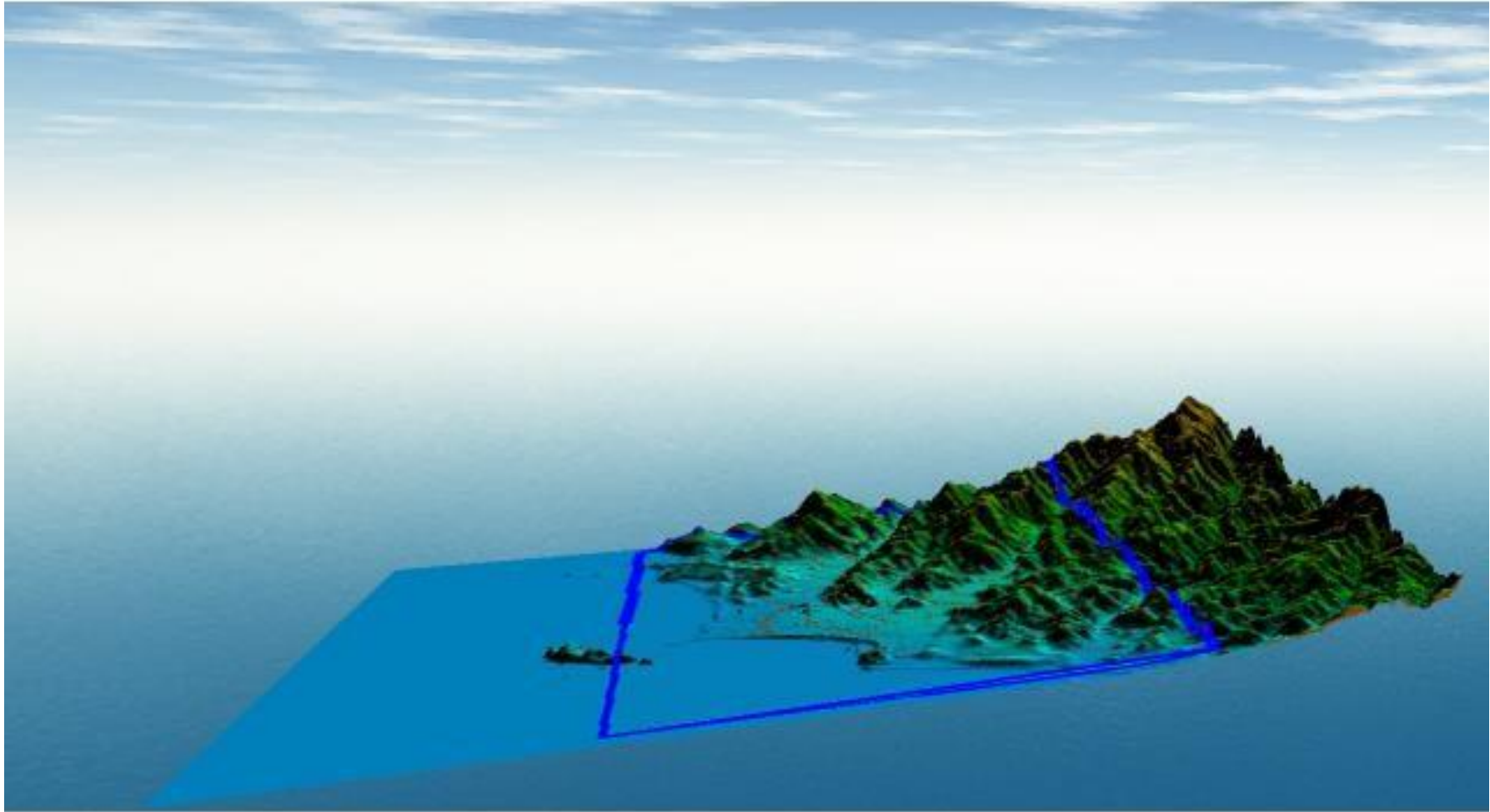
ANEXO V: PLANOS
PLANO EN UTM DE ESTACIONES



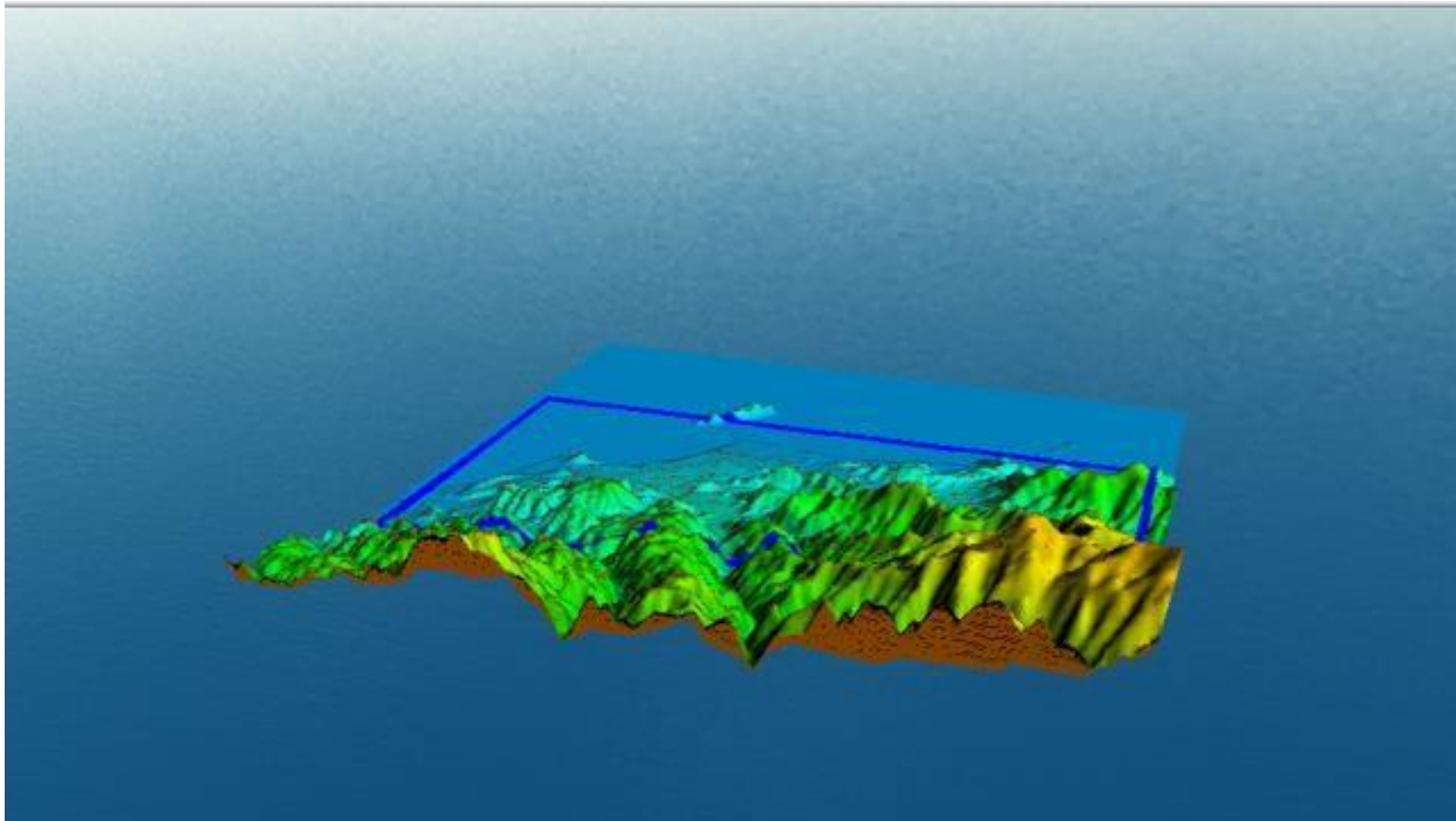
Vista 3D del Modelo MDLE



Vista 3D de Modelo MDLE de Sur - Norte



Vista 3D de Modelo MDLE de Este - Oeste



Vista 3D de Modelo MDLE de Este - Oeste

